



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## VLIV AKUMULACE NA PROVOZ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

THE EFFECT OF ACCUMULATION ON DISTRIBUTION GRID OPERATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Jestřáb

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Tomáš Jestřáb

**ID:** 152662

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vliv akumulace na provoz distribuční sítě

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Vlastnosti akumulace připojované do distribuční sítě
2. Popis a analýza současného stavu zadané sítě
3. Vliv plošné instalace FVE na provoz sítě
4. Vliv plošné instalace akumulace na provoz sítě

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 22.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

#### Bibliografická citace práce:

JESTŘÁB, T. *Vliv akumulace na provoz distribuční sítě*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

#### Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za odborné vedení, podnětné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této práce. Zároveň bych rád poděkoval pracovníkům z oddělení Přípravy investic a připojování společnosti E.ON za vstřícnost a zodpovězení všech mých otázek. Rovněž děkuji své rodině, přátelům a přítelkyni za jejich trpělivost a podporu v průběhu celého studia.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv akumulace na provoz distribuční sítě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.5.2017

.....



Diplomová práce

# **Vliv akumulace na provoz distribuční sítě**

**Bc. Tomáš Jestřáb**

**vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2017**

**Brno**



Master's thesis

# **The Effect of Accumulation on Distribution Grid Operation**

by

**Bc. Tomáš Jestřáb**

**Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2017**

**Brno**

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce v úvodu seznamuje čtenáře s možnými druhy akumulačních technologií elektrické energie, jejich vzájemným srovnáním a využitím. Po uvedení do problematiky navazuje popisem jednotlivých technologií a principů, jež mají v současnosti smysl a uplatnění v praxi. Práce pokračuje částí charakterizující způsoby využití akumulace v síti. Mezi hlavní body této práce však patří analýza vlivu plošné instalace fotovoltaických výroben na provoz zadané distribuční sítě na hladině nízkého napětí a analýza vlivu na síť s připojenou akumulací. Dalším významným cílem bylo vytvoření modelu pro výpočet ustáleného chodu sítě, jenž byl naprogramován na bázi teoretického základu o principech výroby z intermitentních zdrojů a principu funkce akumulace. Výstupy z modelu v podobě zjištěných napěťových poměrů v jednotlivých odběrných místech a průběhů proudů v místě distribučního transformátoru sloužily pro vyhodnocení výše uvedených analýz. Průběhy vypočtených parametrů jsou v práci na základě různých scénářů (dle období, míry integrace výroby a akumulace či výkonu výroby) členěny, přehledně graficky zpracovány a vzájemně porovnávány z pohledu kolísání napětí a změny výkonové (respektive proudové) bilance napájecího transformátoru.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** akumulace; fotovoltaická výroba; distribuční soustava; model; nízké napětí; obnovitelné zdroje energie; odběrné místo

## **ABSTRACT**

This diploma thesis introduces the reader to the possible types of electric energy storage technologies, their comparisons and utilization. After its introduction, it follows the description of individual technologies and principles that are currently meaningful and useful in practice. The thesis continues with the part characterizing the ways of using the accumulation in the grid. However, the main points of this thesis include the analysis of the influence of the photovoltaic installation on the specified distribution grid operation at the low voltage level and the analysis of the influence on the grid with connected accumulation. Another important objective was the model for the calculation of steady-state, which was programmed on the basis of the theory supported by the principles of production from intermittent sources and the principle of accumulation function. The outputs of the model in the form of the calculated voltage ratios at the individual supply points and current flows at the distribution transformer point were used to evaluate the analyzes mentioned above. The courses of the calculated parameters are broken down by different scenarios (according to the period, the degree of integration of production and the accumulation or the power output of the production), graphically processed and compared from the point of view of voltage fluctuations and changes in the power (or current) balance of the supply transformer.

**KEY WORDS:** accumulation; photovoltaic power plant; distribution system; model; low voltage; renewable energy sources; supply point

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK .....	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD .....	14
1.1 VÝVOJ TECHNOLOGIE A ZMĚNY POTŘEB SPOLEČNOSTI.....	15
1.2 POTŘEBA ŘÍZENÍ DECENTRÁLNÍ ENERGETIKY (DECE).....	15
1.3 NÁRODNÍ AKČNÍ PLÁN PRO CHYTRÉ SÍTĚ.....	16
1.4 AKTUALIZOVANÁ STATNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE .....	16
1.5 CÍL PRÁCE .....	18
2 TECHNOLOGIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	19
2.1 TEPELNÁ TECHNOLOGIE .....	19
2.2 MECHANICKÁ TECHNOLOGIE .....	20
2.2.1 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	20
2.2.2 CAES .....	21
2.2.3 AA-CAES .....	21
2.2.4 SETRVAČNÍKY .....	22
2.3 ELEKTROCHEMICKÁ TECHNOLOGIE .....	23
2.3.1 VODÍKOVÁ AKUMULACE .....	23
2.3.2 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY .....	25
2.3.3 NIKL-KADMIOVÉ AKUMULÁTORY .....	26
2.3.4 SODÍKO-SÍROVÉ AKUMULÁTORY .....	28
2.3.5 LITHIOVÉ AKUMULÁTORY .....	29
2.3.6 AKUMULÁTORY S PRŮTOČNÝM ELEKTROLYTEM .....	31
2.4 ELEKTROMAGNETICKÁ TECHNOLOGIE .....	34
2.4.1 SMES .....	34
2.4.2 SUPERKAPACITORY.....	36
3 POROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ.....	37
4 ZPŮSOBY VYUŽITÍ AKUMULACE V SÍTI.....	41
4.1 AKUMULACE V SÍTÍCH S OZE .....	42
4.2 AKUMULACE V RÁMCI SMART GRID .....	43
4.3 AKUMULACE K UDRŽENÍ STABILITY SÍTĚ .....	44
5 POPIS ZADANÉ SÍTĚ .....	45
5.1 VYTVOŘENÍ MODELU PRO VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ.....	45
6 ANALÝZA VLIVU PLOŠNÉ INSTALACE FVE .....	50
6.1 ČERVENCOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE.....	50
6.2 PROSINCOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE .....	53
6.3 DUBNOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE.....	55



---

<b>7 ANALÝZA VLIVU PLOŠNÉ INSTALACE AKUMULACE .....</b>	<b>56</b>
<b>7.1 ČERVENCOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE S AKUMULACÍ .....</b>	<b>56</b>
7.1.1 ČÁSTEČNÁ INSTALACE FVE S INSTALOVANÝM VÝKONEM 10 kWp NA OM.....	56
7.1.2 ČÁSTEČNÁ INSTALACE FVE S INSTALOVANÝM VÝKONEM 14 kWp NA OM .....	58
7.1.3 CELOPLOŠNÁ INSTALACE FVE S INSTALOVANÝM VÝKONEM 14 kWp NA OM .....	60
7.1.4 CELOPLOŠNÁ INSTALACE FVE S INSTALOVANÝM VÝKONEM 20 kWp NA OM .....	61
<b>7.2 PROSINCOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE S AKUMULACÍ .....</b>	<b>62</b>
<b>7.3 DUBNOVÝ STAV – PLOŠNÁ INSTALACE FVE S AKUMULACÍ .....</b>	<b>63</b>
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>66</b>
<b>PŘÍLOHA A .....</b>	<b>68</b>
<b>PŘÍLOHA B.....</b>	<b>69</b>
<b>PŘÍLOHA C .....</b>	<b>70</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1-2 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny z OZE .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-1 Diagram účinností přečerpávací vodní elektrárny.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-2 Schéma s popisem principu skladování pomocí CAES.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-3 Setrvačnickové generátory pro napájení tokamaku COMPASS-D .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-4 Schéma palivového článku.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-5 Akumulační stanice Notrees v západním Texasu (USA).....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-6 Konstrukce hermetického NiCd akumulátoru válcového tvaru .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2-7 Principiální schéma sodíko-sírového akumulátoru .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 2-8 Akumulační systém v areálu rozvodny Minami-Soma .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 2-9 Principiální schéma VRB akumulátoru .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 2-10 Principiální schéma ZnBr akumulátoru .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 2-11 Schéma vnitřního uspořádání superkapacitoru.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-1 Porovnání specifického výkonu a energie akumulačních technologií.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3-2 Porovnání výkonu a kapacity s dobou vybíjení při jmenovitém výkonu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3-3 Porovnání účinnosti cyklu jednotlivých akumulačních technologií .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-1 Spotřeba elektrické energie v EU a podíl OZE na jejím průběhu .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-1 Detail části zadané sítě obce Křižanovice u Vyškova.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5-2 Typové diagramy dodávky pro odběr bez tepelného využití elektřiny.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5-3 Typové diagramy dodávky pro odběr s akumulačním spotřebičem .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5-4 Výchozí schéma pro výpočet ustáleného chodu sítě při instalaci FVE .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-5 Výchozí schéma pro výpočet ustáleného chodu sítě při instalaci FVE s akumulací .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6-1 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (odbočka 0 %) .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6-2 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (odbočka -2,5 %).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6-3 Červencové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 6-4 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a <math>P_{inst} = 10 \text{ kWp}</math> .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-5 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE o <math>P_{inst} = 20 \text{ kWp}</math> .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-6 Prosincové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 6-7 Prosincové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-8 Prosincové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a <math>P_{inst} = 10 \text{ kWp}</math> .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-9 Dubnové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-10 Dubnové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE .....</i>	<i>55</i>

<i>Obr. 7-1 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (10 kWp) s akumulací.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 7-2 Červencové průběhy proudů tekoucí DT při část. inst. FVE (10 kWp) s akumulací.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7-3 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (14 kWp) s akumulací.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 7-4 Červencové průběhy proudů tekoucí DT při část. inst. FVE (14 kWp) s akumulací.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 7-5 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a <math>P_{\text{inst}} = 14 \text{ kWp}</math> .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7-6 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE (14 kWp) s akumulací .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 7-7 Červencové průběhy proudů tekoucí DT při celopl. inst. FVE (14 kWp) s akumulací ...</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 7-8 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE (20 kWp) s akumulací .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-9 Červencové průběhy proudů tekoucí DT při celopl. inst. FVE (20 kWp) s akumulací ...</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-10 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a <math>P_{\text{inst}} = 20 \text{ kWp}</math> .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 7-11 Dubnové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE s akumulací.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 7-12 Dubnové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE s akumulací.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-13 Dubnové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a <math>P_{\text{inst}} = 10 \text{ kWp}</math>.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. C-1 Vývojový diagram pro akumulaci elektrické energie.....</i>	<i>70</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Porovnání technických parametrů vybraných akumulčních technologií.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. A-1 Zadané parametry jednotlivých odběrných míst pro částečnou instalaci FVE.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. B-1 Zadané parametry jednotlivých úseků mezi po sobě následujícími odběrnými místy.....</i>	<i>69</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Zkratka</i>	<i>Vysvětlivka</i>
<i>ASEK</i>	Aktualizovaná Státní energetická koncepce
<i>CAES</i>	Compressed Air Energy Storage – úložiště se stlačeným vzduchem
<i>ČR</i>	Česká republika
<i>DECE</i>	Decentralizovaná výroba
<i>DS</i>	Distribuční soustava
<i>DT</i>	Distribuční transformátor
<i>ES</i>	Elektrizační soustava
<i>EU</i>	Evropská unie
<i>FVE</i>	Fotovoltaická elektrárna (fotovoltaická výrobná)
<i>HTS</i>	Vysokoteplotní supravodiče
<i>LTS</i>	Nízkoteplotní supravodiče
<i>MVE</i>	Malá vodní elektrárna
<i>NAP SG</i>	Národní akční plán pro chytré sítě
<i>NN</i>	Nízké napětí
<i>OM</i>	Odběrné místo
<i>OTE</i>	Operátor trhu s elektřinou
<i>OZE</i>	Obnovitelné zdroje energie
<i>PVE</i>	Přečerpávací vodní elektrárna
<i>SMES</i>	Superconducting Magnetic Energy Storage – supravodivé magnetické úložiště
<i>TDD</i>	Typový diagram dodávky elektřiny
<i>TES</i>	Thermal Energy Storage – tepelné akumulární úložiště
<i>VTE</i>	Větrná elektrárna

# 1 ÚVOD

Akumulace je tématem provázející energetiku od dob, kdy se objevují zdroje elektrické energie, u nichž se z různých důvodů vyplatí provoz i v případě, že o jejich produkci není poptávka. Tento stav vede k tomu, že v určitém časovém období je zařízení a jeho provozovatel odběratelem elektrické energie – zařízení elektrickou energii ze sítě spotřebovává, v jiném je pak elektrina dodávána, jelikož zařízení a jeho provozovatel je dodavatelem (výrobcem) elektrické energie. Tato schopnost akumulátoru se promítá do všech ohledů provozu takového zařízení se všemi pozitivními i negativními dopady.

Z celé řady hledisek akumulace v elektroenergetice se mezi ty nejvíce diskutované dostávají témata věnující se samotným principům a systémům akumulace. Vyřešení technologicky, ekonomicky i komerčně dostupných a přijatelných variant akumulace je pro její praktické využití nezbytnou podmínkou. Není však od věci přemítat nad otázkou nutnosti její potřeby. Je třeba zkoumat a vytvářet analýzy, na jejichž základech budeme schopni si jasně odpovědět a formulovat požadavky pro každý jednotlivý energetický subjekt počínaje výrobou elektrické energie v různých místech ES a spotřebitelem konče. Následně přichází na řadu reálné aplikace v praxi, které požadavky a potřeby jednotlivých subjektů potvrdí.

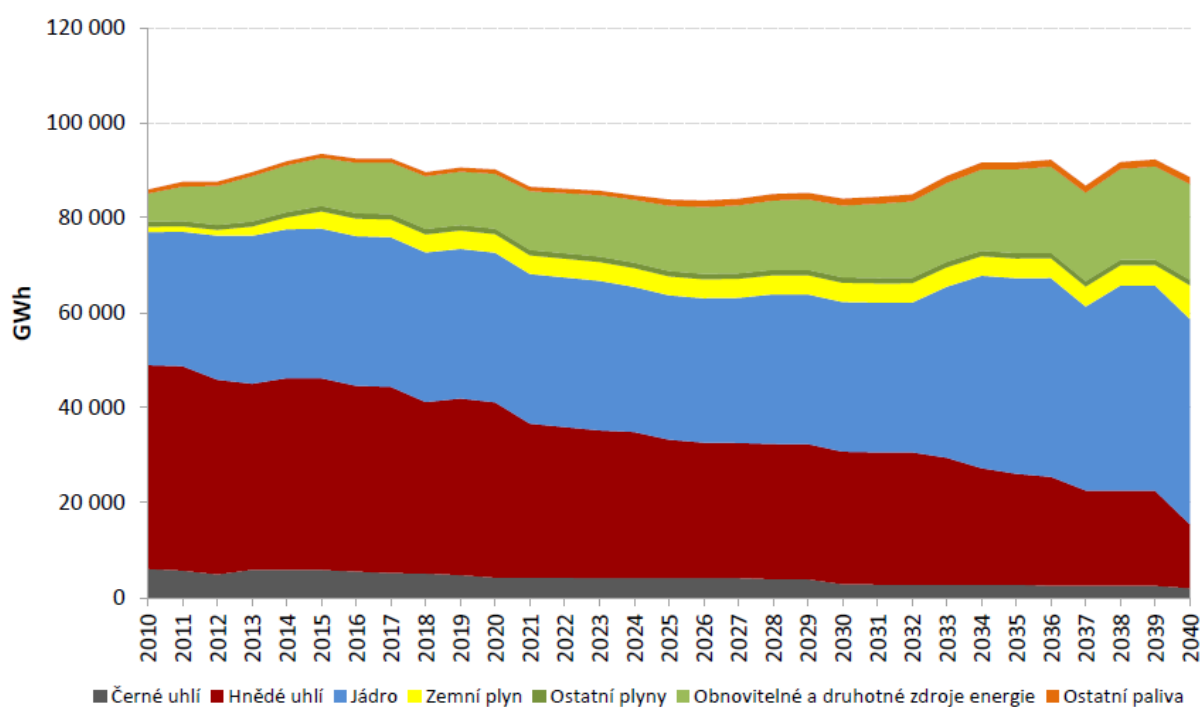
Jedním z klíčových témat rozvoje současné energetiky je implementace obnovitelných zdrojů energie do energetických soustav. Předpokládá se, že v budoucnu bude velké množství energie vyráběno decentralizovaně. V mnoha případech se má jednat o zdroje, jež jsou závislé na počasí – fotovoltaické solární elektrárny a kogenerační zdroje. Jak tyto výrobní v budoucích soustavách provozovat a rozvíjet zároveň celou soustavu, je klíčovou otázkou pro další vývoj tohoto oboru. S nárůstem zastoupení OZE v ES se začínají objevovat v rámci provozu DS nové problémy. Mezi ty hlavní patří zejména přetoky výkonů v sítích z nižších napěťových hladin do vyšších, nebezpečí vzniku přepětí nebo kolísání napětí. Je to dáno faktem, že doba výroby energie z OZE (zejména z FVE) často nekoreluje s dobou spotřeby elektrické energie. Jako použitelné řešení se považuje akumulace nadbytečné energie vyrobené z OZE a její následné využití v době zvýšené spotřeby. Právě této problematice s využitím přebytků vyrobené elektrické energie a vlivu nasazené akumulace na provoz distribuční sítě se bude tato diplomová práce v různých variantách primárně věnovat.

## 1.1 Vývoj technologie a změny potřeb společnosti

Energetika je a bude technicko-sociálním oborem. Současná moderní společnost bez energetiky nedokáže žít a očekává se, že tato závislost se bude nadále neustále navyšovat. Nejde jen o komfort klimatizací a elektronické vybavy, elektrická energie je nezastupitelná pro zajištění základních potřeb, ale i pro zajištění bezpečnosti a fungování společnosti. Nový vývoj decentralní energetiky stanovuje nutnost nových řídicích metod a postupů v celém tomto segmentu.

## 1.2 Potřeba řízení decentralní energetiky (DECE)

Stávající elektrizační soustava byla budována na základě flexibility uhelných bloků, které postupem času pomalu dosluhují. Tyto uhelné bloky pokrývají změny spotřeby mezi zimou a létem, mezi všedním a pracovním dnem, mezi dnem a nocí a poskytují i většinu rychlých regulačních služeb. Řada nových decentralních zdrojů tuto funkci postrádá a zároveň při současné integraci klade nároky na flexibilitu soustavy. Například fotovoltaické zdroje mají podle očekávaného scénáře tvořit elektrický výkon až 6000 MW, což je srovnatelné s šestinásobkem výkonu jaderného bloku v Temelíně. Podle počasí tuto energii v soustavě mít budeme, nebo také ne, avšak při současném uspořádání funguje spotřeba nezávisle na tom, co právě probíhá na straně výroby. [3]



Obr. 1-1 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny, převzato z [1]

Obr. 1-1 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny, převzatý ze schválené Aktualizované státní energetické koncepce (ASEK), demonstruje očekávaný vývoj. Podíl výroby z tepelných elektráren na hnědém uhlí, které doposud drží flexibilitu a stabilitu dodávek, postupně klesá. Část zdrojů znázorněná zelenou a žlutou barvou naopak závisí na počasí a nutnost takové regulace navyšuje. Konkrétní opatření, která by měly být realizována, jsou obsažena v Národním akčním plánu pro chytré sítě (NAP SG). Centrální výroba elektřiny a provozování distribučních soustav s decentrální výrobou nejsou dvě oddělené disciplíny, ale pouze dva konce stejného systému, které si mohou v poledne konkurovat a v době možného nedostatku v ranní či odpolední špičce zase vytvářet příležitosti pro dovozy nebo další zdroje. [3]

### 1.3 Národní akční plán pro chytré sítě

Z důvodu očekávaného nárůstu výroby v malých zdrojích připojených do distribuční sítě a integrace velkého objemu výroby elektřiny z intermitentních zdrojů je třeba zajistit spolehlivý provoz elektrizační soustavy. Rozvoj distribuované (decentrální) výroby elektřiny může přispět k optimalizaci využití distribuční sítě díky fyzické blízkosti výroby a spotřeby (v tomtéž odběrném místě, nebo v téže lokalitě), případně zlepšit řízení spotřeby v odběrném místě (místech) v závislosti na okamžité schopnosti připojeného zdroje elektřiny. Zároveň ale bude znamenat vyšší technické i organizační nároky na řízení a regulaci elektrizační soustavy České republiky. [2]

V současné době je řízení rovnováhy ES plně pokryto nákupem rezervního výkonu z velkých klasických zdrojů. V případě předpokládaného rozvoje decentrální výroby včetně OZE je nezbytné zapojit do problematiky řízení rovnováhy soustavy i zmíněné decentrální zdroje a také stranu spotřeby. To vyvolává nutnost změny v oblasti sítí přenosové i distribuční soustavy ve smyslu technologických změn, nových sofistikovanějších řešení jak hardwarových, tak softwarových (chytré sítě) a rovněž i změnu modelu řízení elektrizační soustavy. [2]

V České republice byl Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG) schválen usnesením vlády a jedná se tedy o závazný postup. Na základě nových řešení v rámci chytrých sítí budou mít jednotliví účastníci trhu možnost hrát aktivní roli na energetickém trhu, což je plně v souladu s cíli EU. Zcela novým fenoménem se stane využívání flexibility na straně poptávky pro řízení bilance soustavy (včetně možnosti podílet se na poskytování Podpůrných služeb). Očekává se, že jedním z takových prostředků bude např. elektromobilita, při jejíž vhodné integraci do distribuční sítě se může zajistit vyšší flexibilita v síti potřebná pro udržení soustavy v provozu i s odhadovaným objemem kolísající výroby FVE a VTE. [2]

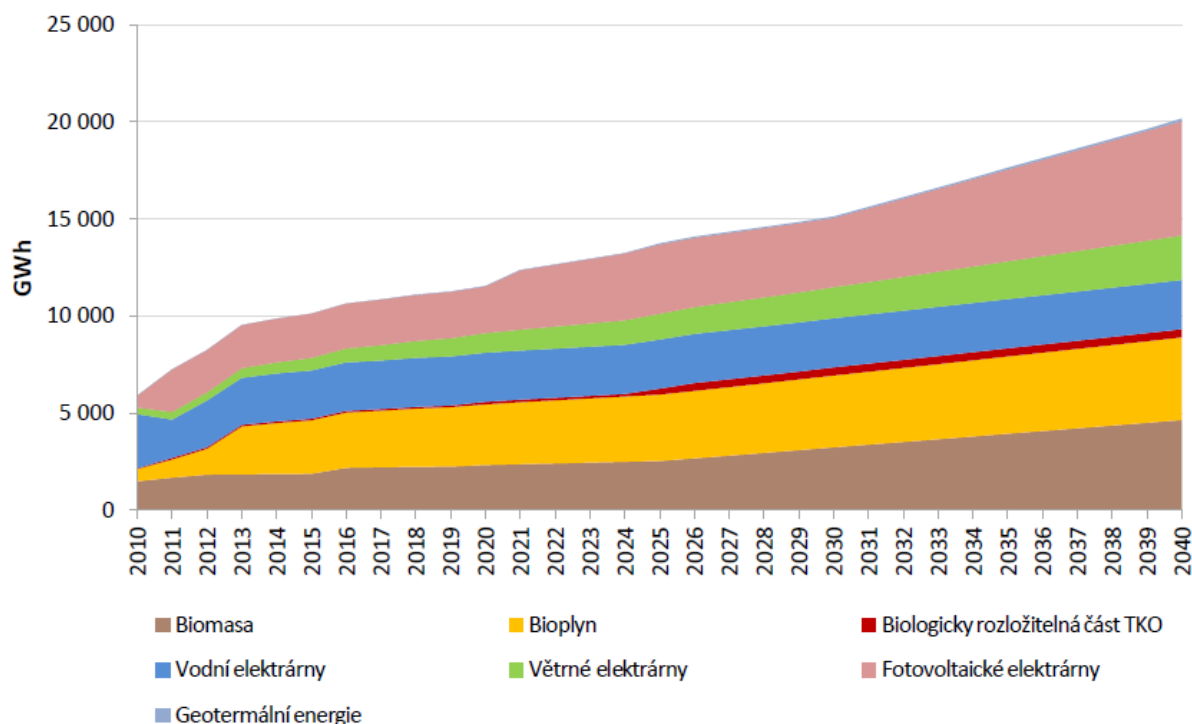
### 1.4 Aktualizovaná státní energetická koncepce

Podle scénářů Aktualizované státní energetické koncepce (ASEK) i podle NAP SG se bude měnit charakteristika elektrizační soustavy ČR v následujících letech až do roku 2040 následovně:

1. Naroste podíl OZE, především fotovoltaických elektráren. Může narůst také výroba v bioplynu, která je při uskladnění vyrobeného plynu použitelná na výrobu elektřiny v době, kdy je elektřiny nedostatek.
2. Sníží se podíl uhelných elektráren, které dodávají stávající podpůrné služby a z velké části reflektují také denní změny poptávky, tedy především mezi denním a nočním odběrem.
3. Naroste podíl mikrokogeneračních zdrojů (například se očekává 1000 MW instalovaného elektrického výkonu v mikrokogeneracích).
4. Zvýší se „smart“ vlastnosti soustavy.



Může se navýšit aktivní podíl inteligentních budov a elektromobility, zejména bude-li poptáván jako žádaná vlastnost infrastruktury. Rozvoj decentralizované výroby elektřiny ovlivňuje zejména výrobu z klasických (uhelných, plynových a jaderných) elektráren, které musí flexibilně reagovat na výrobu z FVE a VTE. Stávající podpora OZE deformuje trh s elektřinou, netržním způsobem snižuje cenu silové elektřiny a tím dochází ke znevýhodnění nepodporovaných zdrojů. Důsledkem tohoto vývoje je snižování výroby v klasických zdrojích, pokles jejich rentability až na úroveň uzavírání zdrojů, což vede až k neochotě investorů vynakládat finance do nových klasických elektráren. Výhody využívání OZE však spočívají v menší závislosti na potřebě spalování primárních zdrojů energie (uhlí a plyn) a omezení produkce CO<sub>2</sub>. [3]



Obr. 1-2 Vývoj a struktura hrubé výroby elektřiny z OZE, převzato z [1]

Současný a očekávaný rozvoj výroby elektřiny a tepla z OZE daný strategií EU v oblasti ochrany životního prostředí a snahy o snížení závislosti na dovozu primárních zdrojů energie přináší zásadní změny v požadavcích na způsob provozování ES a trh s elektřinou. Jak již bylo naznačeno v předchozích oddílech, výroba elektřiny přestává být plně řízena poptávkou/spotřebou a je v oblasti OZE ve stále větší míře závislá na přírodě (fotovoltaické elektrárny – FVE a větrné elektrárny – VTE). Integraci těchto decentralizovaných zdrojů lze řešit konvenčními způsoby, tj. silovou technologií, popř. vhodnou kombinací konvenčních řešení s novými technologiemi, které spadají do konceptu NAP SG. Vhodnou kombinací těchto přístupů lze docílit významného snížení investic na integraci predikovaného objemu decentralní výroby. [2],[3]

Očekávané změny v elektroenergetice, zejména vyšší zapojení zákazníků a významné zastoupení decentralní výroby v energetickém mixu, představuje velkou změnu dosavadní podoby energetiky a vyvolá značné náklady na straně provozovatelů přenosových a distribučních soustav. Národní akční plán pro chytré sítě poskytuje přehled potřebných změn v oblasti legislativy, infrastruktury, koncových zařízení a tarifního modelu, aby cíle vytyčené v Aktualizované státní energetické koncepci byly dosaženy. Pro splnění těchto cílů, respektive realizaci nutných změn bude třeba vynaložit ve sledovaném horizontu do roku 2040 významné finanční prostředky především na straně provozovatelů distribučních soustav. [2],[3]

## 1.5 Cíl práce

Cílem diplomové práce je variantní posouzení vlivu plošné instalace FVE na provoz zadané distribuční sítě nízkého napětí a také analýza vlivu nasazení akumulace na provoz sítě, a to zejména z pohledu kolísání napětí a změny výkonové (respektive proudové) bilance napájecího transformátoru. Součástí práce bude teoretická část popisující vlastnosti jednotlivých druhů technologií akumulace elektrické energie, jejich vzájemné srovnání a využití v elektrizační soustavě. V návaznosti na teoretické poznatky, pochopení principů výroby z intermitentních zdrojů a funkce akumulace, bude vytvořen model pro výpočet ustáleného chodu sítě, jehož výstupy (v podobě zjištěných napěťových poměrů v jednotlivých odběrných místech a průběhů proudů v místě distribučního transformátoru) budou sloužit k vyhodnocení výše uvedených analýz. Posuzované varianty budou členěny dle období, míry integrace výroby a akumulace či instalovaného výkonu výroben.

## 2 TECHNOLOGIE AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Následující kapitola bude popisovat jen technologie akumulace elektriny, které mají v současnosti možné uplatnění v praxi nebo jejichž vývoj je k takovému využití v nejbližší době směřován nebo již byly uskutečněny funkční podoby i v případech, že jejich další rozvoj je neperspektivní nebo čekají na pokrok v jiných technologiích. Je na místě poznamenat, že v souvislosti s akumulací elektrické energie se vyskytují termíny jako supravodivost, speciální materiály či vysoké rychlosti. Prioritou se ukazují být speciální materiály a jejich způsob zpracování. Zásadní změnou pro akumulaci mohou být například nanotechnologie využívající elektrochemické principy. V případě odborného pohledu na technologii akumulace, můžeme nalézt poměrně jasně ohraničenou množinu základních principů, které jsou pro tuto oblast typické. Ne všechny jsou však v současnosti použitelné.

### 2.1 Tepelná technologie

Následující technologie využívají tepelnou energii a schopnosti její akumulace do hmoty materiálu. Míra schopnosti akumulovat závisí především na hodnotách tepelné kapacity vztažené například k hmotnosti či k objemu. Pro akumulaci tepelné energie se v praxi používají klasické, či přírodní materiály, slané roztoky. Novější technologie již využívají různé druhy roztavených solí, zejména se využívají fázové přechody materiálů, např. eutektické systémy, jejichž výhodou je teplota „nabitého“ zásobníku, která je blízká teplotě prostředí. Tato schopnost se následně pozitivně projevuje v podobě nižších ztrát v otázce ukládání a nižších nákladů na konstrukci těchto zásobníků díky snížené izolaci.

#### Látky se změnou skupenství

Pro akumulaci tepelné energie se hojně využívají látky se změnou skupenství v rozsahu, a to v rámci jejich vlastních teplot tání. Akumulace do současných materiálů se vyplatí tehdy, je-li akumulční schopnost vyšší než jejich bod tání. Parafíny a vosky se velice dobře uplatňují, neboť jejich teploty tání jsou blízké teplotě varu vody. Využívá se tzv. eutektických slitin, jež vytváří při tuhnutí krystaly. Teplota tání dvou kovů, by měla být, pokud je to možné, co nejbližší. Eutektická teplota je pak důležitou vlastností, protože se jedná o teplotu nižší, než je teplota tání každé ze složek. Během tuhnutí se latentní teplo odevzdává, takže teplota zůstává po nějakou dobu stejná. Následně začne teplota slitiny klesat. [4]

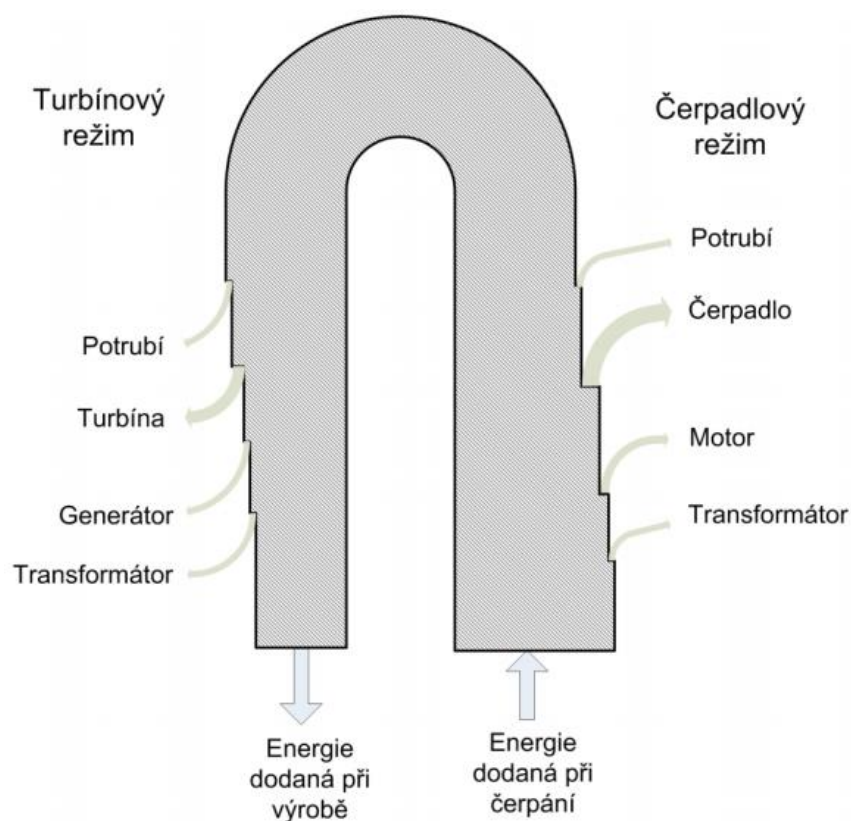
Z pohledu elektroenergetiky však tyto látky nemají příliš velký význam, tím pádem tato práce nebude dále rozvíjet popis vlastností těchto materiálů. Jejich vývoj však nadále pokračuje i přes jejich malý význam pro tuto oblast energetiky. Příkladem přírodních látek, které mohou být využity pro uchovávání tepelné energie, jsou například voda, kámen, cihla apod. Z umělých látek lze jmenovat například beton. [4]

## 2.2 Mechanická technologie

Využití mechanické technologie ukládání energie je obvyklé v oblasti velkých kapacit a velmi vysokých výkonů, a to díky zvýšení potenciální energie velkého objemu vody – přečerpávací vodní elektrárny. K tomuto principu se v současnosti přidává ukládání energie kinetické (rotační) v podobě využití setrvačníků. V nich je zastoupení speciálních materiálů s vysokou pevností, magnetických ložisek a vakua. Jako poslední druh z mechanických technologií bude uvedena energie tlaková, většinou ve formě stlačeného vzduchu.

### 2.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

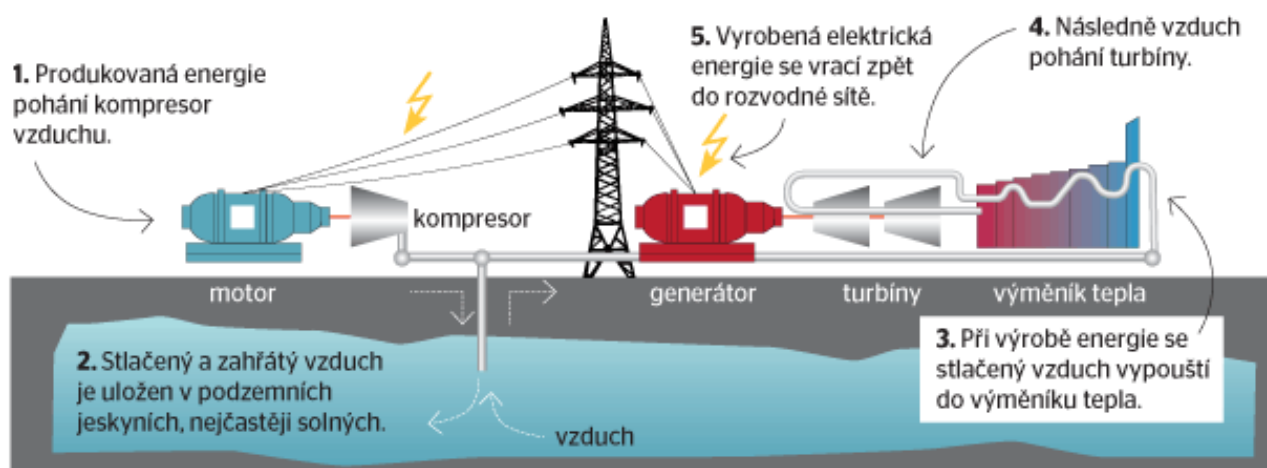
Přečerpávací vodní elektrárny jsou všeobecně známým pojmem. Jejich součástí jsou dvě nádrže – horní a spodní, přičemž v případě nedostatku elektrické energie v síti (v době špiček) se naakumulovaná voda z horní nádrže přepouští do spodní. Při této cestě voda naráží na lopatky turbíny, která pohání hydroalternátor, jenž vyrábí elektrickou energii. Naopak v době mimo energetickou špičku (např. v noci) se provádí umělá akumulace tak, že se voda přečerpá zpět do nádrže horní a sníží tak ztráty z nevyužité energie. Zároveň se díky PVE dokáže předejít problémům s výkyvy ve spotřebě, respektive odběru elektrické energie v rámci elektrizační soustavy. Mezi jejich další klady patří rychlost náběhu elektrárny (v desítkách až stovkách sekund), životnost (vyšší desítky let) či jednoduchost na obsluhu. Je nutno dodat, že pro další rozvoj PVE jsou nutné vhodné geografické podmínky, neboť samotná elektrárna jako celek je významným zásahem do přírody jako takové, přičemž i investice na její výstavbu patří v porovnání výstaveb různých typů elektráren mezi ty ekonomicky náročnější vztaheno k jednotce instalovaného výkonu. Tento typ akumulace obsahuje nejvyšší kapacitu soudě dle všech známých technologií a je limitován jen velikostí horních a spodních nádrží, avšak není vhodný pro rychlou reakci (do 10 s) na neočekávanou spotřebou v rámci sítě NN či VN.



Obr. 2-1 Diagram účinností přečerpávací vodní elektrárny, převzato z [5]

### 2.2.2 CAES

Akumulace energie prostřednictvím stlačeného vzduchu (spíše známá pod zkratkou CAES – Compressed Air Energy Storage) není stále příliš rozšířená, přestože první pokusy sahají až k počátku první poloviny minulého století. Její princip spočívá ve využití elektrické energie v době nízké spotřeby ke stlačení vzduchu kompresorem a jeho následnému uložení v podzemních vzduchotěsných zásobnících nebo kavernách. V době vyšší potřeby energie se stlačený vzduch uvolní s cílem pohánět turbínu, která přemění kinetickou energii na elektrickou. Doba náběhu CAES obvykle nepřevyšuje 12 minut. První spuštěná CAES elektrárna byla Huntorf v Německu roku 1977 se schopností generovat 300 MW do 11 minut (v případě nouze 290 MW do 6 minut). Druhé komerční zařízení využívající CAES je McIntosh na území státu Alabama (USA) o výkonu 110 MW a době náběhu do 14 minut. Velkou nevýhodou CAES je nízká účinnost, která v případě německé jednotky dosahuje 42 %, u americké jednotky je nepatrně vyšší. Problém je zejména v ohřevu vzduchu během jeho stlačování (komprese) a ochlazování při jeho expanzi. V praxi to znamená, že při stlačování dochází ke ztrátě tepelné energie, tudíž je nutné vzduch před následnou expanzí znovu zahřívát. [6]



Obr. 2-2 Schéma s popisem principu skladování pomocí CAES, převzato z [7]

### 2.2.3 AA-CAES

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, akumulace pomocí CAES patří již mezi starší technologie, které byly uvedeny do provozu v sedmdesátých letech minulého století. Hlavní nevýhodou je malá účinnost, která se pohybuje okolo 50 %, přičemž hlavním faktorem ztrát je ztráta tepelné energie při kompresi vzduchu. Tento problém se snaží řešit technologie AA-CAES, která funguje na stejném principu CAES, avšak dochází zde k uskladnění tepelné energie při kompresi, kterou pak dále využije při ohřátí vzduchu před výrobou elektrické energie. Tímto vylepšením se zvyšuje účinnost až na 70 % a může se vyrovnat přečerpávacím vodním elektrárnám. Zároveň zde odpadá zmíněná nutnost ohřívání vzduchu. Určitou překážkou v možném rozšíření tohoto typu akumulace mohou být zvýšené investiční náklady oproti CAES a potřeba objemného tepelného akumulátoru. Na prototypu AA-CAES se již podílí německé firmy projektem ADELE ve městě Stassfurt, který je aktuálně ve své finální fázi a očekává se během roku jeho spuštění. Jeho účinnost by měla dosahovat výše zmíněných 70 %, přičemž doba náběhu dodávky výkonu 260 MW by neměla přesáhnout 15 minut. [8],[9]



### 2.2.4 Setrvačníky

Další možností akumulace energie je pomocí těžkého setrvačníku. Setrvačníky se používaly na uskladnění energie již před několika tisíci lety. Tento typ uložení energie se zakládá na mechanické setrvačnosti. Těžký rotující disk je roztáčen elektromotorem připojeným na stejné hřídeli, který se chová jako generátor elektrické energie při brzdění roztočeného disku. Elektrická energie je tedy akumulována v kinetické energii disku. Tření se musí udržovat na minimu tak, aby se energie co nejdéle zachovala. Toto se obvykle dosahuje tak, že se disk umístí v prostředí vakua a použijí se magnetická ložiska, které však zvyšují investiční náklady. Vyšší rychlosti rotace umožňují akumulovat větší množství energie, nicméně se však zvyšují nároky na pevnost materiálů jako ocel, případně kompozitních materiálů. Materiál disku je namáhán odstředivými, resp. dostředivými silami. Celková energie setrvačníku je závislá na velikosti a rychlosti rotoru a výkon je závislý na motor-generátoru. [10]



Obr. 2-3 Setrvačnickové generátory pro napájení tokamaku COMPASS-D, převzato z [11]

Setrvačníky v elektrizačních soustavách slouží k vyrovnávání krátkodobých výkyvů frekvence a výkonu a na pokrývání drobných výpadků sítě. Jsou vhodnými zdroji pohotovostního výkonu do naskočení jiného náhradního zdroje. Nejvhodnější využití u OZE by však nejspíše bylo přímo u fotovoltaických elektráren, kde by například u chvilkových výpadků zapříčiněných mraky tento setrvačnick dále běžel a tuto krátkou mezeru vyplňoval. Zde by se tedy využilo největší výhody setrvačnicku – jeho krátká náběhová doba (řády milisekund) a vysoký výkon (v řádech MW). Setrvačníky se rovněž používají jako zdroje nepřetržité dodávky elektrického proudu, tzv. UPS (například ve velkých datových centrech) na překlenutí krátkého času, od momentu, kdy se v hlavním přívodu přeruší dodávka proudu do doby, dokud naběhne diesellový generátor. V současnosti jsou v provozu dva setrvačníky, které se nachází v Ústavu fyziky plazmatu v areálu Akademie věd ČR v Praze. Poskytují zde nezbytný příkon (2 x 35 MW) pro provoz tokamaku COMPASS-D, neboť možný příkon k dispozici z rozvodné sítě zde byl pouze 1 MW. V případě výpadku jednoho z nich systém umožní okamžité připojení záložního setrvačnicku pro napájení tokamaku za současného snížení výkonu plazmatu. [10],[11]

## 2.3 Elektrochemická technologie

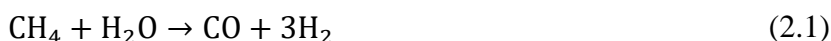
Elektrochemické technologie akumulace se zakládají na principu reakce některých chemických látek, jehož výsledkem je elektrická energie umožňující i zpětnou konverzi (při napájení výsledných látek z předchozí reakce, kdy se elektrická energie vyráběla). Těchto možností je několik a běžně se s nimi setkáváme, od tužkových baterií do různých elektronických nástrojů, až po rozvíjející se nápad vozidel fungujících na elektrickou energii – elektromobilů. Oblast akumulace skrze elektrochemické technologie prochází v současnosti dynamickým vývojem. Speciálním typem ukládání energie v tomto segmentu mohou být i principy využívající tzv. elektrochemické palivové články.

### 2.3.1 Vodíková akumulace

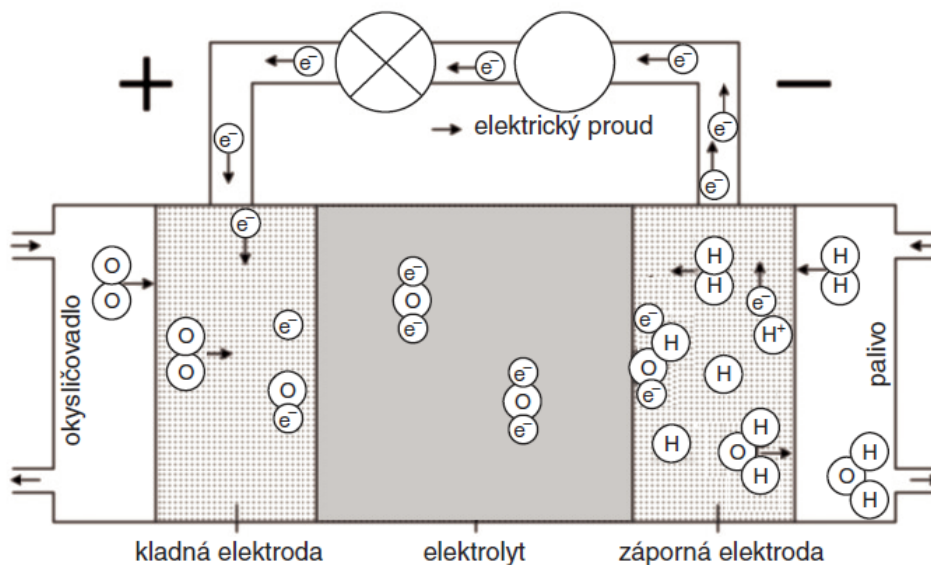
Vodík se jako zdroj energie používá už asi 200 let a je hlavní složkou syntetických plynů vyráběných zplynováním fosilních paliv i biomasy. Nyní představuje využívání vodíku přibližně 1 % všech zdrojů energie, ale zatím většinou jde o vodík získaný z fosilních paliv. Myšlenka vodíkových energetických systémů (tzv. vodíkové hospodářství) se zkoumá od 60. let 20. století. Nejprve šlo o využití mimošpičkového výkonu zejména z jaderných elektráren, podobně jako je tomu u přečerpávacích elektráren. Teprve v poslední době přibyla i možnost využití přebytečného výkonu solárních fotovoltaických systémů a větrných elektráren. U obnovitelných zdrojů energie je akumulace energie do výroby vodíku zvláště perspektivní, neboť tak by nerovnoměrnost jimi dodávaného výkonu nečinila problémy v rozvodné síti. Podstatou je využití určitého druhu energie (většinou elektrické) k výrobě vodíku elektrolyzou vody a poté jeho jímání a skladování pro pozdější použití. Takto akumulovaná energie může být později přeměněna oxidací vodíku na jiný druh energie, např. elektrickou, mechanickou či tepelnou. K oxidaci může docházet buď přímým spalováním v plynovém kotli či ve spalovacím motoru, nebo řízeně elektrochemickou cestou v palivovém článku. Zkapalněný vodík se používá jako palivo pro raketové motory a počítá se s ním i pro proudová letadla. [5],[10],[12]

K výrobě 1 kg vodíku elektrolyzou vody je třeba energie asi 38 kWh při účinnosti elektrolyzérů 90 % a ke zkapalnění 1 kg vodíku ještě asi 10 kWh. Vodík jako palivo má určité výhody. Jeho výhřevnost je nejvyšší ze všech paliv – zhruba 100 MJ/kg (závisí na čistotě). Spalováním vodíku vzniká pouze vodní pára a menší množství oxidů dusíku, nevznikají oxidy uhlíku a síry ani jiné škodliviny. Kapalný i plyný vodík lze použít jako palivo do spalovacích motorů, ale takové motory musí být k tomu účelu zvláště konstruovány. Již existují automobily či autobusy na vodík a také čerpací stanice pro ně určené. [12]

Vodík lze vyrobit i chemickou reakcí metanu za vysokých teplot (800 až 1 700 °C), přičemž nastávají reakce:



Reakce mohou probíhat v tzv. fotochemickém reaktoru, kde se vysokých teplot dosahuje koncentrací slunečního záření. Ke skladování vodíku jsou určeny speciální tlakové zásobníky vyrobené z materiálů nereagujících s vodíkem. V mnoha materiálech totiž vodík difunduje do krystalické mřížky a působí křehnutí materiálu. Vodík lze vázat i na kovové prášky, s nimiž tvoří hydridy kovů. S vodíkem je nutné při jeho skladování zacházet velmi opatrně, podle přísných bezpečnostních norem. Již malé množství vodíku ve vzduchu tvoří výbušnou směs. Energie akumulovaná do vodíku může být opět přeměněna na elektrickou energii ve zmíněných palivových článcích řízenou elektrochemickou reakcí – tzv. studenou oxidací vodíku neboli studeným spalováním. [12]



Obr. 2-4 Schéma palivového článku, převzato z [12]

Palivové články jsou elektrochemická zařízení přeměňující chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo na generaci elektrického proudu za vzniku menšího množství tepla. Kontinuálně musí být přiváděno palivo i okysličovadlo k elektrodám a odváděny spaliny. Nejjednodušší a nejpropracovanější jsou palivové články založené na slučování vodíku s kyslíkem, viz Obr. 2-4. Porézní elektrody jsou odděleny elektrolytem, v oblasti pórů vzniká třífázové rozhraní, kde dochází k elektrochemické oxidaci paliva a k redukci okysličovadla. Pórovitá elektroda umožňuje elektrolytu vzlínat do pórů, ale tlak plynu za elektrodou nedovoluje kapalině póry pronikat. Elektrody bývají z ušlechtilých materiálů (např. platiny) a fungují i jako katalyzátory chemických reakcí. Na záporné elektrodě nastává reakce:



a dva volné elektrony se předají elektrodě. Na kladné elektrodě nastává reakce:



a dva volné elektrony se přijmou z elektrody. Celkovou reakci lze tedy vyjádřit rovnicí:





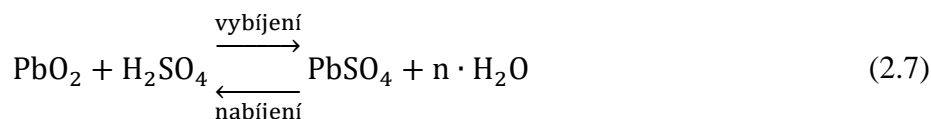
Existují palivové články různých konstrukcí, rozměrů a maximálních výkonů. Podle konstrukce a typu mohou pracovat při teplotách od 60 do 1000 °C, jako palivo mohou používat kromě vodíku např. metan (CH<sub>4</sub>), metanol (CH<sub>3</sub>OH), hydrazin (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) apod., elektrolytem může být např. roztok kyseliny fosforečné (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), hydroxidu draselného (KOH), tavenina alkalických uhličitů či pevný oxidický elektrolyt (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Napětí jednoho palivového článku bývá lehce nad 1 V, přičemž články se rovněž mohou skládat sériově do baterií. Zajímavým využitím palivových článků je vodíkový elektromobil, který nemá spalovací motor s přímým vstřikováním, ale palivové články a elektromotor. [5],[12]

### 2.3.2 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory mají jednoduchou konstrukci, skládající se z jednotlivých článků v plastové nádobě odolné proti kyselině. Z každého článku jsou vyvedeny olověné vývody, které jsou přímo napojeny na olověné pláty (elektrody). Elektrolyt je směs kyseliny sírové H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a čisté destilované vody H<sub>2</sub>O. V elektrolytu se pohybují volné ionty H<sup>+</sup> a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, které umožňují jeho dobrou vodivost a zároveň nabíjení či vybíjení akumulátoru. Samotný olověný akumulátor se skládá z několika článků, které jsou sériově propojeny a krajní dva jsou vyvedeny nad vnější kryt akumulátoru. Většina akumulátorů má otvory pro odvod plynů, vznikajících při chemických procesech, případně u akumulátorů, které potřebují údržbu, jsou otvory pro kontrolu elektrolytu. Kryt a izolace si musí udržet svůj charakter hermetičnosti i při vyšších provozních teplotách. Proces vybíjení je založen na základě chemické reakce, během které se olovo na záporné elektrodě přeměňuje na síran olovnatý, který se rozptýluje do elektrolytu podle rovnice:



Na kladné elektrodě dochází ke sloučení oxidu olovičitého a kyseliny sírové na síran olovnatý a vodu, podle rovnice:



Proces vybíjení je v ideálním případě indikován přeměnou elektrolytu na vodu a usazeniny síranu olovnatého. Proces nabíjení je opačný proces vybíjení. Olověné akumulátory se využívají od roku 1850, kdy ve svých počátcích sloužily zejména na akumulaci elektřiny z větrných turbín. Jejich výhodou je poměrně nízká cena a účinnost kolem 75 %. Jejich nevýhodou je nízká energetická hustota, velká váha, krátká životnost, nízký počet cyklů (nabití – vybití), náchylnost na okolní teplotu a zejména problematická likvidace. Největší stanice s olověnými bateriemi se nacházejí v Portoriku s výkonem 20 MW a s kapacitou 14 MWh nebo akumulární stanice Notrees v západním Texasu (USA) s parametry 36 MW a 24 MWh, která slouží pro vyrovnávání průběhu vyrobené elektrické energie z nedalekého větrného parku o instalovaném výkonu 153 MW. Na této stanici však má během roku 2016 dojít k nahrazení olověných akumulátorů lithium-iontovými od společnosti Samsung SDI. [5],[9],[13]



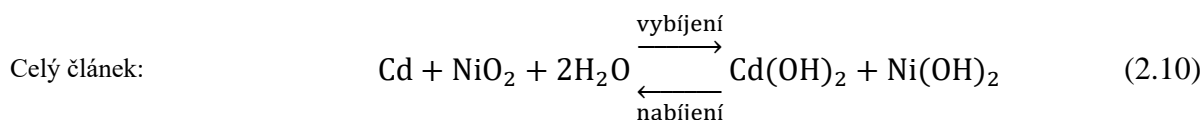
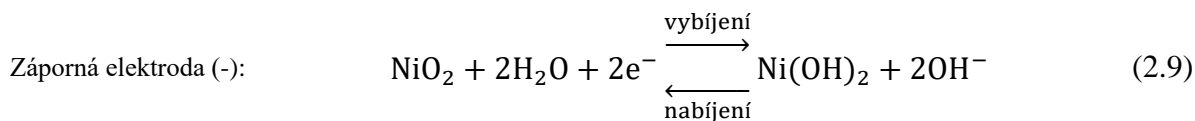
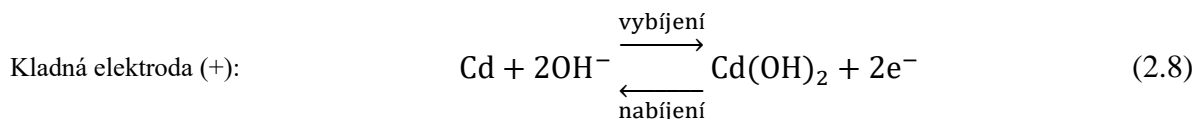
Obr. 2-5 Akumulační stanice Notrees v západním Texasu (USA), převzato z [9]

### 2.3.3 Nikl-kadmiové akumulátory

Prvním prakticky použitelným alkalickým akumulátorem se stal na začátku 20. století takzvaný Edisonův železo-niklový akumulátor, jehož elektrolytem byl roztok hydroxidu sodného NaOH. Záměnu sloučenin železa jako aktivní složky záporné elektrody kadmíem vytvořil Švéd Ernst Waldemar Jungner dokonalejší nikl-kadmiový (NiCd) akumulátor. Průmyslová výroba takových akumulátorů se rozvinula po druhé světové válce především ve Francii a v Německu, avšak namísto roztoku NaOH se začal používat jako elektrolyt hydroxid draselný KOH. [14],[15]

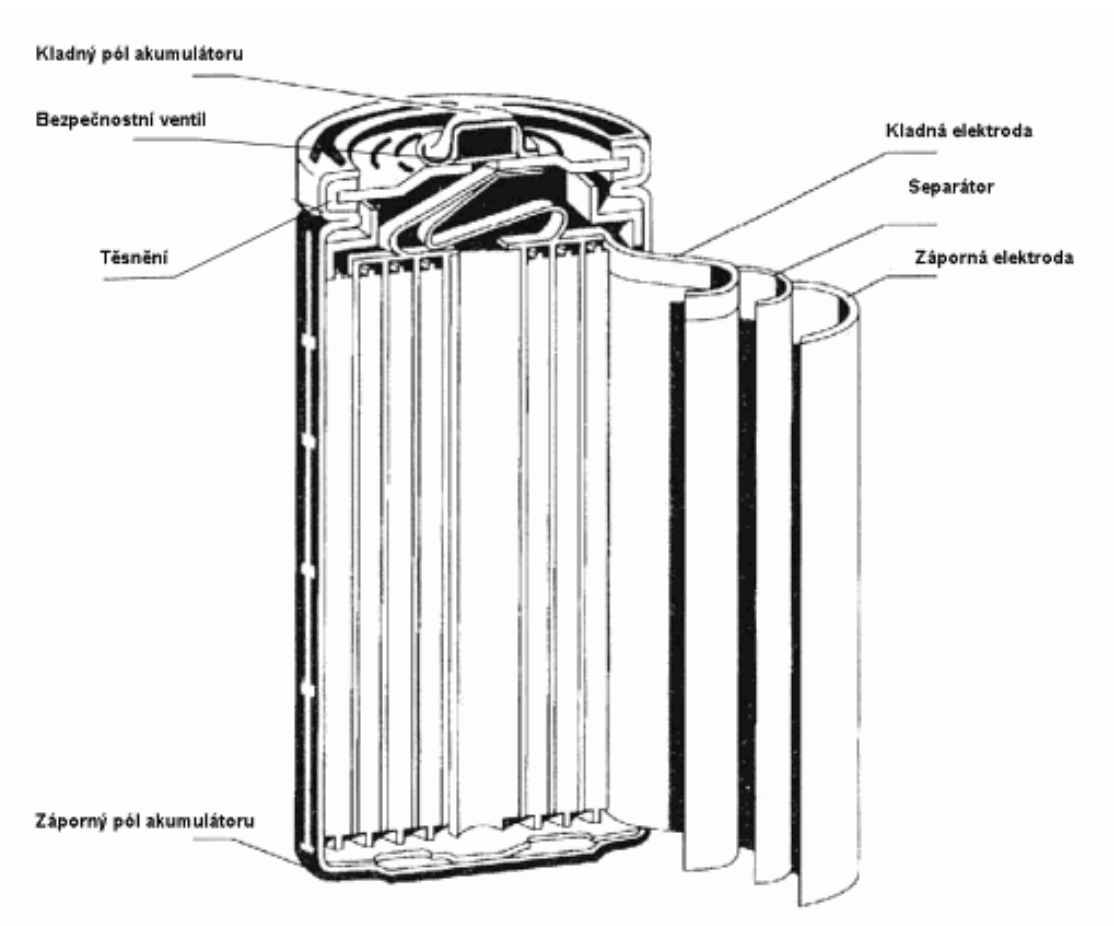
Nikl-kadmiový článek se skládá ze systému kladných a záporných elektrod oddělených separátory, které jsou ponořeny v elektrolytu. Podle konstrukce akumulátoru mohou být elektrody deskové, nebo pro akumulátory menších kapacit vinuté. Aktivním materiálem kladné elektrody v nabitém stavu je oxid niklitý  $\text{NiO}_2$  a ve vybitém stavu hydroxid nikelnatý  $\text{Ni(OH)}_2$ . Aktivním materiálem záporné elektrody je v nabitém stavu kovové kadmium Cd a ve vybitém stavu hydroxid kademnatý  $\text{Cd(OH)}_2$ . Nosná konstrukce desek obou polarit je z oceli, na kterou nepůsobí elektrolyt, a proto si po celou dobu životnosti článku zachovává svou pevnost. [14],[15]

Podle způsobu uložení aktivní hmoty rozdělujeme elektrody na trubkové (aktivní hmota je uložena do systému perforovaných ocelových trubic), kapsové (aktivní hmota je uložena v takzvané kapse, vytvořené prostorem mezi dvěma perforovanými ocelovými plechy) a spékané (sintrované), jejichž aktivní hmota je v porézním skeletu ze speciálně upraveného niklového materiálu. Pro spékané elektrody se používají jako nosiče aktivní hmoty niklové vláknité nebo vysoce porézní materiály, do kterých se uloží aktivní hmota v pastovitěm stavu. Ty jsou po vysušení a mechanických úpravách osazeny ocelovými kontakty. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu draselného KOH s přídavkem asi 5 % hydroxidu lithného LiOH s měrnou hmotností 1,19 až 1,21 g/cm<sup>3</sup>. Zásaditý elektrolyt na rozdíl od kyselého zajišťuje pouze přenos iontů, to znamená, že během provozu článku nedochází k jeho chemickým změnám ani k jeho znehodnocení. Během nabíjení, nebo vybíjení nedochází ke změně hustoty, takže tímto způsobem není možné indikovat stav nabití článku. Jmenovité napětí článku je 1,2 V. [14],[15]



Separátory jsou řešeny použitím inertních porézních materiálů z plastu nebo skleněných vláken. U vinutých elektrod jsou separační vrstvy vinuté současně s elektrodami, podobně jako při výrobě svitkových kondenzátorů. První skupinu NiCd článků představují články s deskovými elektrodami. Jejich nádoby jsou převážně plastové (polyethylen, polypropylen), u starších konstrukcí a pro náročné aplikace jsou ze silně poniklovaného ocelového plechu. Každý článek je osazen zátkou, která umožňuje odvětrání článku, brání úniku tekutého elektrolytu a také umožňuje doplňování elektrolytu a brání průniku plamene do článku v případě, že by došlo k zapálení unikajících plynů při nabíjení. Svorky jsou ocelové, poniklované, převážně ve tvaru svorníku se závitem. Měrná kapacita NiCd akumulátoru složeného z článků s deskovými elektrodami (články 60 Ah) je kolem 35 Wh/dm<sup>3</sup> a 22 Wh/kg. [14],[15]

Ve srovnání s olověným akumulátorem je NiCd akumulátor při stejné kapacitě asi o třetinu těžší a zabírá dvojnásobek prostoru. Proto je tento typ NiCd akumulátoru určený hlavně jako záloha primárních zdrojů pro osvětlení v budovách, případně exteriérech, v železničních vozech a podobně. V praxi se všeobecně nachází v místech, kde nezáleží na rozměrech a hmotnosti záložního akumulátoru. Hlavní přednosti NiCd akumulátorů proti ostatním systémům je vysoká spolehlivost a životnost, možnost odběru velmi vysokých proudů, schopnost rychlého a velmi rychlého nabíjení, velký rozsah pracovních teplot pro vybíjení (-40 °C až + 70 °C) a výborné mechanické vlastnosti jako je odolnost vůči nárazům a vibracím. Nevýhody NiCd akumulátorů jsou například, menší měrná energie na hmotnost, nebo objem, náhlý pokles napětí na konci vybíjení a obsah kadmia, který je klasifikován jako látka škodlivá životní prostředí. NiCd baterie mají vysokou energetickou hustotu a dosahují velkých výkonů, proto jsou velmi rozšířené, avšak podstatně dražší než olověné akumulátory. [15]



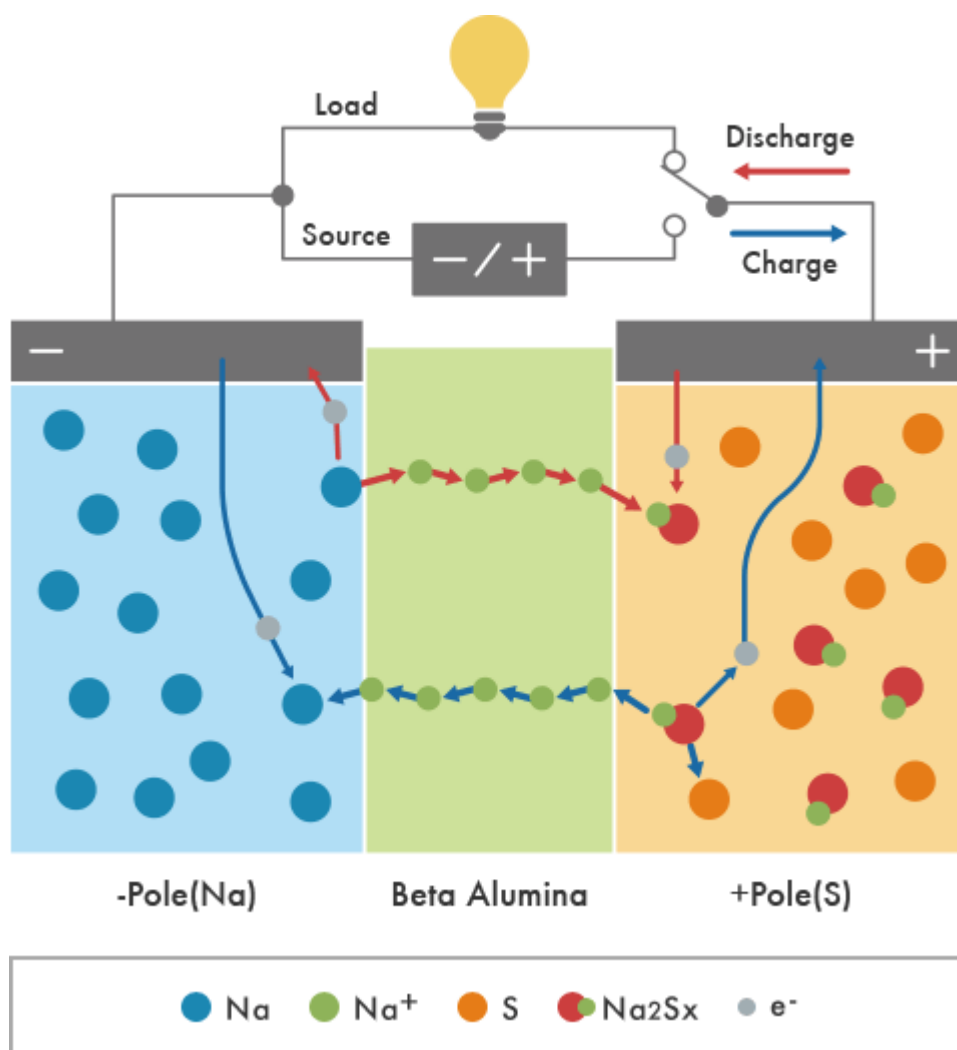
Obr. 2-6 Konstrukce hermetického NiCd akumulátoru válcového tvaru, převzato z [14]

### 2.3.4 Sodíko-sírové akumulátory

Baterie sodík-síra (NaS) se skládá z kapalné síry na kladné elektrodě a kapalného sodíku na záporné elektrodě. Tyto aktivní materiály jsou rozděleny pevným elektrolytem z keramického oxidu hlinitého. Elektrolyt umožní průchod pouze kladným iontům sodíku, které se pak spojí se sírou a vytvoří polysulfidy sodíku.



Během vybíjení kladné ionty  $\text{Na}^+$  procházejí elektrolytem a tok elektronů ve vnějším obvodu baterie vytváří asi 2 V. Tento proces je vratný, protože při nabíjení uvolňují polysulfidy sodíku kladné ionty sodíku zpět do elektrolytu, kde se znovu usazují jako elementární sodík. Aby byl tento proces možný, je baterie uchovávána při teplotě asi 300 °C. Účinnost bateriových článků sodík-síra je asi 89 %. Hlavní nevýhodou je malá aplikační pružnost, protože spuštění článku vyžaduje jeho zahřátí na provozní teplotu, při které se projeví jeho výhodné provozní vlastnosti. Uplatnění proto nachází pouze tam, kde je neustále zatěžován vybíjecími a nabíjecími cykly bez časových přestávek, čímž se zajišťuje jeho stálá provozní teplota. V tomto provozním stavu vydrží 1000 až 2500 cyklů (nabití/vybití). [10]



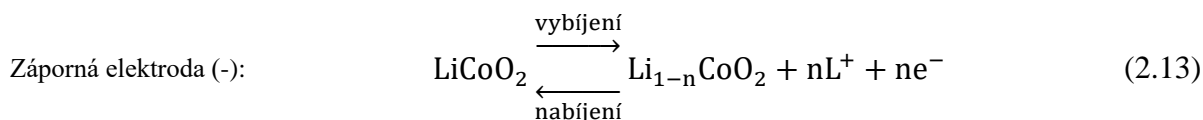
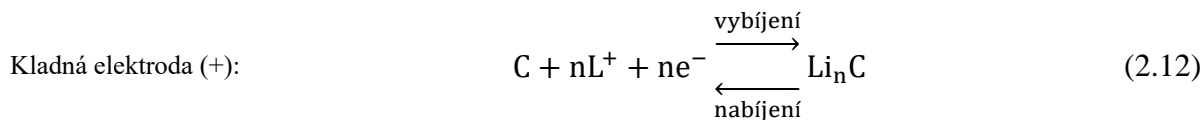
Obr. 2-7 Principiální schéma sodíko-sírového akumulátoru, převzato z [16]

NaS baterie jsou rozšířené zejména v Japonsku. Technologie baterií sodík-síra byla v Japonsku nasazena ve více než 190 lokalitách s celkovým výkonem přes 270 MW, přičemž akumulovaná energie je vhodná pro omezování špiček denně po dobu 6 hodin. Na jihu Itálie jsou již v provozu tři akumulační jednotky od společnosti NGK o celkovém výkonu 34,8 MW a kapacitě 278,4 MWh. Největší italský provozovatel přenosové sítě Terna využívá tyto jednotky s cílem redukce přetížení v soustavě. Obecně poptávka po akumulátorech sodík-síra jako účinném prostředku pro stabilizaci výstupu z obnovitelných zdrojů a zajištění podpůrných služeb neustále roste. V Evropě se připravují další projekty, stejně jako v Japonsku a USA. [9],[10]

### 2.3.5 Lithiové akumulátory

Lithium jako chemický prvek se vyznačuje vysokou hodnotou elektrochemického potenciálu. První pokusy o zhotovení funkčního lithiového článku (primárního) byly ve 20. letech minulého století. První použitelné primární články se začaly vyrábět po roce 1970. Asi o 10 let později byly na trh uvedeny sekundární články (lithiové akumulátory). Články se vyrábějí v modifikacích s tekutým elektrolytem pod označením lithium-iontové (Li-Ion), nebo s tuhým elektrolytem označované jako lithium-polymerové Li-Pol. Akumulátorový článek se skládá ze systému kladných a záporných elektrod oddělených separátory a elektrolytu v tekutém stavu. [10]

Materiálem katody jsou různé oxidy kovů, např.  $\text{LiCoO}_2$ , nebo  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , případně  $\text{LiNiO}_2$ . Anoda je z grafitu, nebo z amorfního uhlíku. Elektrolytem je lithiová sůl v organických rozpouštědlech jako například  $\text{LiBF}_4$  či  $\text{LiClO}_4$ . Při nabíjení baterie se atomy lithia v katodě stávají ionty a prostupují elektrolytem směrem k uhlíkové anodě, kde se spojují s vnějšími elektrony a jsou uloženy mezi uhlíkové vrstvy jako atomy lithia. Při vybíjení je proces opačný. [15]



Li-Ion akumulátory se vyznačují rychlou dobou náběhu (v řádech milisekund), vysokým výkonem na jednotku objemu či hmotnosti a také vysokou účinností cyklu (až 97 %). V případě velkých akumulátorů je nutné vyřešit několik problémů. Největší překážkou je vysoká cena kvůli zvláštnímu obalu, vnitřnímu ochrannému obvodu proti přetížení a systému, který zabraňuje úplnému vybíjení, neboť to snižuje životnost akumulátoru. Několik společností pracuje na snížení výrobních nákladů na Li-Ion baterie, aby se prosadily na velkých energetických trzích. Jedna z největších akumulčních jednotek s lithiovými akumulátory je aktuálně v provozu v areálu japonské rozvodny Minami-Soma v prefektuře Fukušima. Akumulační systém o výkonu 40 MW a kapacitě 40 MWh z výroby společnosti Toshiba slouží zejména pro skladování přebytečné energie vyrobené z flexibilních zdrojů, kterou pak uvolňuje v případě potřeby. [9],[15],[17]



Obr. 2-8 Akumulační systém v areálu rozvodny Minami-Soma, převzato z [17]



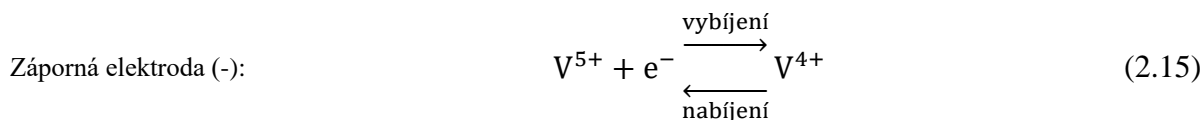
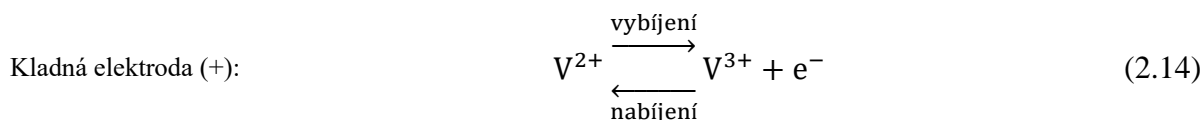
### 2.3.6 Akumulátory s průtočným elektrolytem

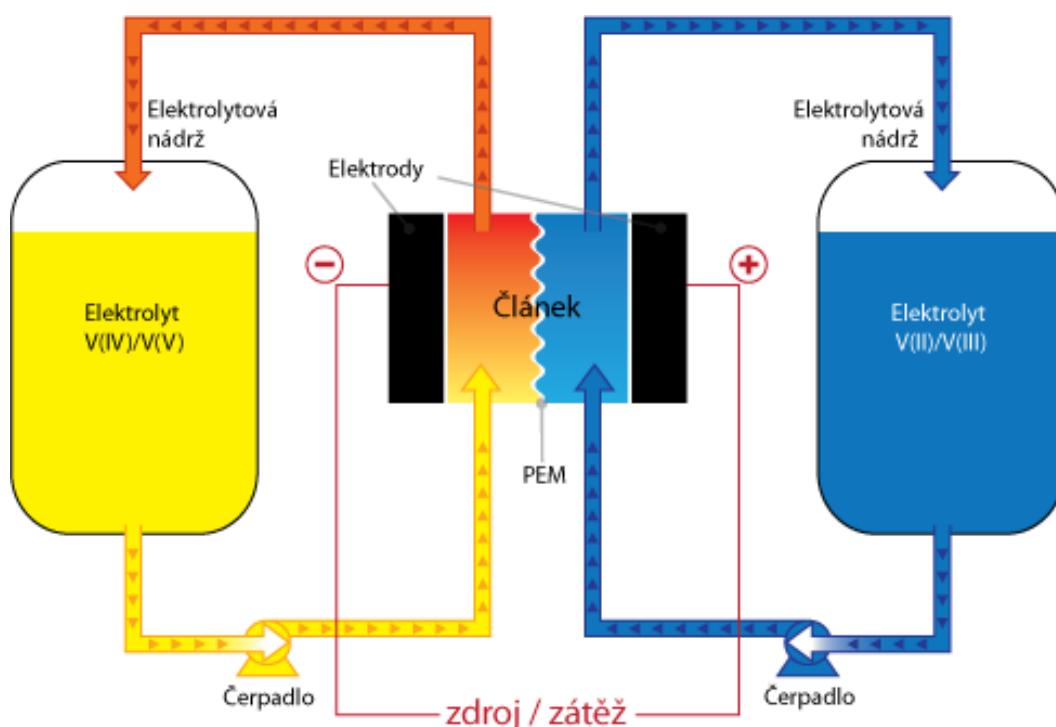
Jedná se akumulární zařízení využívající přeměnu elektrické energie na chemickou. Na rozdíl od klasických sekundárních bateriových článků je energie uložena ve dvou různých elektrolytech, které jsou po celou dobu od sebe odděleny speciální membránou. Obě elektrody reagují pouze s jedním roztokem elektrolytu, který se vytvořil během procesu nabíjení. Právě tato vlastnost je velkou výhodou akumulátorů s průtočným elektrolytem, protože právě elektrolyt můžeme skladovat v neomezeně velkých zásobnících. Elektrolyt přitom nepodléhá degradačním procesům, má tedy tak téměř neomezený počet nabíjecích cyklů. Membrána musí umožňovat průchod iontů a je jedním z mála prvků systému, kterou je třeba po čase měnit. [10]

Životnost je však odhadována okolo 15 tisíců cyklů a nejedná se o nikterak technicky náročnou činnost. Princip průtočných baterií je podobný principu palivových článků, až na oddělení jednotlivých složek paliva, které s sebou přináší nespornou výhodu v podobě reverzibility celého procesu. V rámci jednoho zařízení je tedy možné provádět nabíjení i vybíjení, stejně jako je tomu u sekundárních baterií. V současnosti existuje několik druhů baterií s průtočným elektrolytem, z nichž nejznámější je vanadium redoxová baterie (VRB), bromid sodná baterie (BR/S, PSB) či zinko-bromidová baterie (ZnBR). Jediná vanadium redoxová baterie nepodléhá degradaci elektrod, tím pádem během její životnosti není třeba tyto elektrody měnit. I díky této vlastnosti se v současnosti jeví jako nejperspektivnější technologie z průtočných baterií pro akumulaci z obnovitelných zdrojů energie. [12],[15]

#### 2.3.6.1 Vanadové redoxní akumulátory

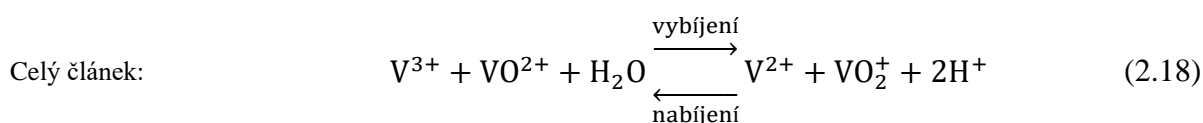
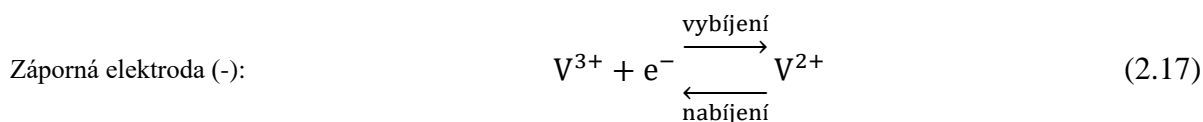
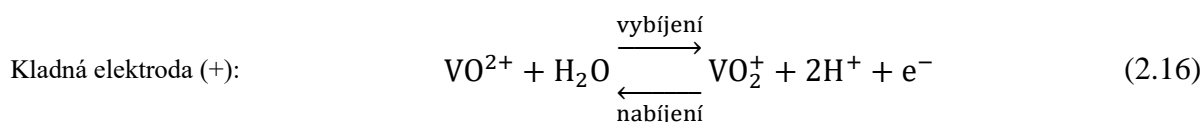
Vanadové redoxní baterie (VRB) byly prvně použity na australské University of New South Wales (UNSW) v roce 1986. Společnost Australian Pinnacle Vanadium Redox Batteries odkoupila základní patenty v roce 1998 a poskytla na ně licenci společností Sumitomo Electric Industries (SEI) a VRB Power Systems. VRB jsou postaveny na vanadovém redoxním palivovém článku. Oproti konvenčním akumulátorům, u nichž se celá energie soustředí uvnitř článku, je energie u VRB uložena chemicky v elektrolytech umístěných v samostatných nádržích. VRB se skládá ze dvou těchto nádrží s elektrolytem, které obsahují aktivní vanadovou sůl v různých oxidačních stavech (pozitivní: V(IV)/V(V) redoxní pár, negativní V(II)/V(III) redoxní pár) a koncentrovanou kyselinu sírovou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. [18]





Obr. 2-9 Principiální schéma VRB akumulátoru, převzato z [18]

Elektrolyty jsou průběžně pomocí čerpadel čerpány z nádrží a proudí přes články, zatímco elektrický proud přichází nebo se vrací zpět do nádrží s elektrolytem. Články obsahují iontoměničovou membránu (PEM), na které dochází k oxidaci jednoho z elektrolytů a redukci druhého elektrolytu. Membrána o tloušťce 0,25 mm zároveň zabraňuje promíchání těchto dvou elektrolytů. Články jsou zapojeny do série a jsou umístěny v zásobnících. Rozhodující chemické reakce probíhají na uhlíkových FELT elektrodách. Vzniklé reakce nemění chemicky ani fyzikálně vlastnosti elektrod, tím pádem je umožněn velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů bez znatelného snížení kapacity akumulátoru (více než 10000 cyklů). Napětí akumulátoru je v rozmezí 1,2–1,6 V a čistá účinnost tohoto systému může dosahovat až 85 %. Hodnoty energetického a elektrického výkonu VRB jsou stejně jako u ostatních akumulátorů s tokem iontů nezávislé. Během nabíjení a vybíjení dle [18] dochází v elektrolytu ke změnám oxidace vanadu, které jsou popsány v následujících chemických reakcích:

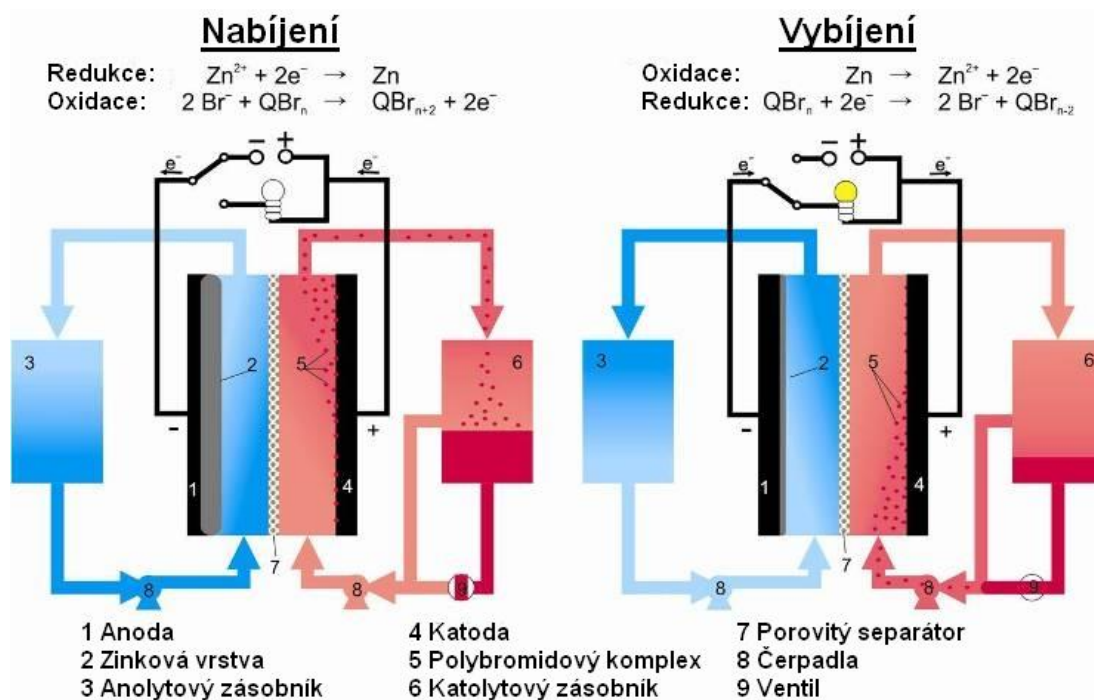




Většina současně provozovaných projektů s průtočnými bateriemi je spíše demonstračního či vědeckého rázu. V současnosti největší instalace proběhla na ostrově Hokkaido, kde společnosti Hokkaido Electric Power (HEPCO) a Sumitomo Electric Industries (SEI) nainstalovali akumulací systém VRB o výkonu 15 MW s dobou trvání 4 hodin (kapacita 60 MWh). Ověření průtoku baterie bude trvat přibližně tři roky. Konečným cílem projektu je otestování funkčnosti tohoto systému, který má zlepšit parametry v rámci kvality elektrické energie, jenž je ovlivňována výrobou z větrných a fotovoltaických parků na severu ostrova. [19] Další velký projekt se chystá na poloostrově Dalian v severovýchodní Číně, kde společnosti UniEnergy Technologies (UET) a Rongke Power plánují do konce roku 2020 nainstalovat deset jednotek o výkonu 20 MW, přičemž celková kapacita systému těchto jednotek by měla dosáhnout 800 MWh. [20] Na území České republiky je rovněž nainstalována demonstrační jednotka, a to v Jihočeském vědeckotechnickém parku, kde spolu s fotovoltaickým systémem (76 kWp) pracuje 30 kW VRB akumulací systém CellCube FB 30-130 o kapacitě 130 kWh od německé společnosti Gildemeister v kooperaci s českou společností B64. [21]

### 2.3.6.2 Zinko-bromidové akumulátory

Zinko-bromidový (ZnBr) akumulátor byl vyvinut společností Exxon na počátku sedmdesátých let 20. století. V každém článku ZnBr akumulátoru protékají dva různé elektrolyty podél elektrod z uhlíko-plastového kompozitu ve dvou úsecích oddělených mikropropustnou membránou. Během vybíjení se Zn a Br spojí do bromidu zinečnatého a v každém článku se produkuje napětí 1,8 V. Tím se zvyšuje hustota iontů  $\text{Zn}^{2+}$  a  $\text{Br}^-$  v obou nádržích s elektrolytem. Během nabíjení se bude kovový zinek usazovat jako tenká vrstva na jedné straně kompozitní elektrody. Mezi tím se na druhé straně membrány vytvoří brom jako zředěný roztok reagující s ostatními látkami, přičemž se vytvoří hustý bromový olej, který klesne na dno elektrolytické nádrže. Během vybíjení je ho možné smíchat se zbytkem elektrolytu. Čistá účinnost této baterie je asi 75 %, nicméně v ZnBr akumulátorech slouží zinková a bromová elektroda jako substrát pro reakci a jejich kapacita může být zmenšena, jestliže nedochází ke kompletnímu vybití baterie. To je jeden z důvodů, proč nedosahují v současnosti takové životnosti jako VRB akumulátory. [15]



Obr. 2-10 Principiální schéma ZnBr akumulátoru, převzato z [22]

## 2.4 Elektromagnetická technologie

Elektrická energie se přímo akumulovat nedá, tedy až na dvě výjimky a těmi jsou ukládání energie do kondenzátoru a cívky. Při použití kondenzátorů se jedná o dva základní typy. Jsou kondenzátory běžné, u kterých je jejich maximálně využitelná kapacita téměř výhradně pod mezí praktické použitelnosti, a pak jsou známy tzv. super kondenzátory, jež jsou velmi často produktem moderních nanotechnologií, které zvyšují plochu, a tedy i výslednou kapacitu. Druhý směr pojednává o ukládání elektrické energie ve formě elektrického impulsu – do cívek. Tato metoda patří rovněž mezi známé, avšak širší využití je opět limitováno kapacitou. V případě cívek to však není jen technologická otázka výroby, ale zejména ztrát, jež jsou způsobeny zejména odporem vodičů, z nichž je cívka vytvořena. I proto je tato tematika spojena s pojmem supravodivosti. V současné době, kdy je supravodivost tradičních materiálů podmíněna dosažením extrémně nízkých teplot, se tento princip řadí mezi technologie, které se dočkají v budoucnosti velkého posunu, jakmile dojde k rozvoji materiálů supravodivých při běžných teplotách.

### 2.4.1 SMES

První pokusy s akumulací elektrické energie do supravodivých cívek začaly ve Spojených státech amerických v 80. letech 20. století. Princip akumulace energie do magnetického pole je založen na stejnosměrném elektrickém proudu protékajícím cívkou, proto je nutné při použití tohoto typu akumulátoru ve střídavé síti použít měnič, respektive při nabíjení je nutné střídavý proud usměrnit. Cívka tohoto akumulátoru musí být konstruována pro velké proudy ze supravodivého materiálu, to znamená s nulovým odporem vodiče, jinak by se elektrická energie na odporu cívky transformovala na teplo. energii akumulovanou do cívky o indukčnosti  $L$ , kterou protéká proud  $I$ , je možné vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{Ws;H;A}) \quad (2.19)$$

Supravodivost objevil holandský fyzik Heike Kamerlingh-Onnes v roce 1911 ochlazováním různých kovů na teploty blízké absolutní nule (0 K). Onnes zjistil, že při extrémně nízkých teplotách se v některých kovech jako jsou rtuť, cín, či olovo ztrácí elektrický odpor, což jim dává supravodivost – tedy unikátní schopnost vést elektrický proud bez jakýchkoliv energetických ztrát. Už v době jejího objevu se využití supravodivosti spojovalo s vytvářením obrovských magnetických polí, či přenosem velkých proudů elektrické energie. Supravodiče v současnosti našly uplatnění například v technologiích supravodivých magnetických zásobníků energie (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage). Využití takového typu akumulátoru elektrické energie by mělo široké využití, ale problémem zůstává nákladný provoz chladicích zařízení pro udržování vinutí cívky v supravodivém stavu. SMES je složeno ze čtyřech hlavních částí – supravodivý magnet, chladicí systém, napájecí systém klimatizace a řídicí jednotka. [23]

Kritické teploty  $T_c$  supravodičů jsou velmi nízké, nicméně dále rozdělují supravodiče na nízkoteplotní supravodiče (LTS,  $T_c < 20$  K) a vysokoteplotní supravodiče (HTS,  $T_c > 77$  K). Fyzikální vlastnosti LTS vyžadují na chlazení tekuté helium. Vysokoteplotní supravodiče HTS mohou být chlazené tekutým dusíkem, který si vyžaduje mnohem jednodušší a levnější proces chlazení než při použití hélia. Téměř všechny supravodiče, které se používají pro technické účely, jsou vyráběny z NbTi nebo Nb<sub>3</sub>Sn, které vyžadují jako chladicí médium tekuté helium. Pro udržování supravodivého stavu nesmějí být překročeny hodnoty proudové hustoty  $J$ , magnetické indukce vodiče  $B$  a teplota  $T$ . Rozlišujeme dva systémy cívek pro supravodivý magnetický akumulátor a to solenoid, nebo toroid. Vinutí solenoidu je velmi jednoduché, přičemž vinutí toroidní je mnohem komplikovanější a spotřeba supravodiče je v tomto případě asi dvakrát větší. Výhodou toroidu je, že šíření magnetického toku do okolí je téměř vyloučeno vlivem jeho konstrukce. Různé SMES zařízení využívají jako základ stejný princip, ale mají rozdílné použití. [23]

Obecně jsou rozdíly patrné v množství uschované elektrické energie a v použití systému, proto je možné SMES systémy podle těchto kritérií rozdělit na SMES velkého rozsahu, Mikro – SMES či D-SMES (Distributed SMES). Výhody SMES systému jsou, že supravodivost nezpůsobuje žádné nebezpečné chemické reakce, je ekologickým zdrojem, neprodukuje toxické látky, vysoká účinnost (přibližně 90%), vysoká kapacita (závisí na magnetu a požadavcích zátěže), krátký nabíjecí čas (několik minut), velmi rychlá odezva, vysoká životnost systému. Na druhé straně, mezi nevýhody SMES patří vysoké investiční náklady kvůli supravodivému magnetu, krátký čas pokrytí, potřeba permanentního chlazení, problematika rozměrů systému v případě velkokapacitních zařízení SMES, problematika Lorentzových sil (řešením může být uložení cívky v zemi), možný dopad na zdraví (systémy se silným magnetickým polem). [15],[23]

Použití systému s technologií SMES a s řízeným tyristorovým měničem, jenž by byl aplikován v elektrizační soustavě, by mohl být přínosem v oblasti akumulace v distribučních sítích. Tento systém může do budoucna nahradit přečerpávací vodní elektrárny. Akumulace elektrické energie je důležitým procesem, ve kterém je klíčovou otázkou výběr technologie akumulace a celková účinnost systému. SMES technologie nabízí možnosti úpravy parametrů elektrické sítě (napětíové výkyvy, změny ve frekvenci), jakož i samotnou úschovu elektrické energie, a to v nezměněné formě. Důležitým faktorem při provozu takového systému je optimalizace jeho parametrů. Zde vystupují do popředí zejména náklady na údržbu zařízení v zchlazeném a supravodivém stavu. V USA už je v provozu velký počet takových zdrojů. Jsou instalovány zejména v rozvodnách za účelem stabilizace sítě a zvýšení kapacity elektrických vedení. Ve většině jsou dodávány v kontejnerovém, resp. mobilním provedení s výkonem 3-5 MW. [15],[23]

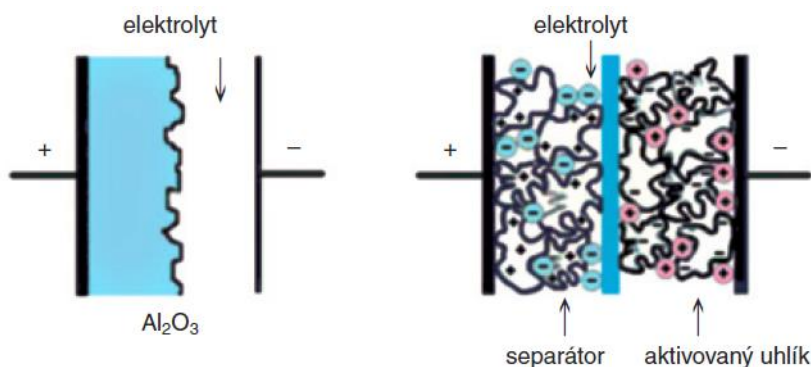
### 2.4.2 Superkapacitory

Akumulace energie v superkapacitorech zažívá rozvoj až v posledních několika letech. Elektrická energie je zde akumulována do elektrického pole nabitého kondenzátoru. Takový kondenzátor je schopen pojmout energii podle známého vztahu:

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (\text{Ws;F;V}) \quad (2.20)$$

Tento vztah platí i pro superkapacitory. Využití superkapacitorů je nyní běžné především v hybridních automobilech a elektromobilech, kde jsou určeny k rychlé akumulaci energie při rekuperaci během brzdění a k rychlému dodání energie pro akceleraci. Díky dobré perspektivě je vývoji superkapacitorů věnována značná pozornost i finanční prostředky pro výzkum a vývoj. Lze tedy očekávat další posun a rozvoj tohoto způsobu akumulace energie. Základem superkapacitorů je speciální materiál elektrod s velkou plošnou hustotou. Jedná se o práškový uhlík nanesený na hliníkovou fólii o ploše v poměru k hmotnosti v řádu  $2000 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$ . Tímto se zajistí kapacita v řádu tisíců faradů. Elektrody superkapacitoru jsou odděleny polypropylenovou fólií a prostor je vyplněn tekutým elektrolytem. Při použití současných elektrolytů je napětí jednoho článku zhruba 2,5 V. Pro akumulaci energie pod vyšším napětím lze články samozřejmě řadit do série. Superkapacitory se vyznačují malým sériovým odporem, a proto jsou tedy vhodné pro rychlé dodávky a odběry energie. Špičkové výkony při uvolnění energie ze superkapacitorů v poměru k jeho hmotnosti jsou v řádech kilowattů na kilogram. V současné době je na trhu několik typů s kapacitami od 2 do 3000 F s napětím 2,7 V na článek. [12],[15]

Vzhledem k malému vnitřnímu odporu tohoto zdroje, který je řádově v jednotkách miliohmů, je vhodné při jeho nabíjení používat napěťové měniče, které jsou schopny omezit velký nabíjecí proud. Tyto měniče mohou řídit rovněž vybíjení superkapacitoru a plnit dodatekové funkce, jako například funkci elektronické pojistky proti přetížení či přepětí, nebo měřit nabíjecí a vybíjecí proud. Výhodou superkapacitorů je poměrně vysoká účinnost akumulace (až 95 %). Nevýhodou je závislost napětí na uloženém náboji, což lze minimalizovat použitím napěťových měničů. Ve srovnání s elektrochemickými akumulátory mají superkapacitory nižší energetickou hustotu, ale až tisíckrát vyšší počet cyklů oproti bateriím. Rovněž cena je zatím poměrně vysoká, ale s objemem zavedení v průmyslu a s nárůstem sériovosti výroby lze předpokládat její pokles. Superkapacitory se jeví vhodné pro použití v oblasti fotovoltaiky, především jako vyrovnávací akumulátory elektrické energie pro menší systémy spojené se sítí, kde mohou kompenzovat krátkodobé výkyvy výkonu. Jejich použití se rovněž předpokládá v ostrovních fotovoltaických systémech, kde by mohly časem konkurovat klasickým elektrochemickým akumulátorům. [12],[15]



Obr. 2-11 Schéma vnitřního uspořádání superkapacitoru, převzato z [12]

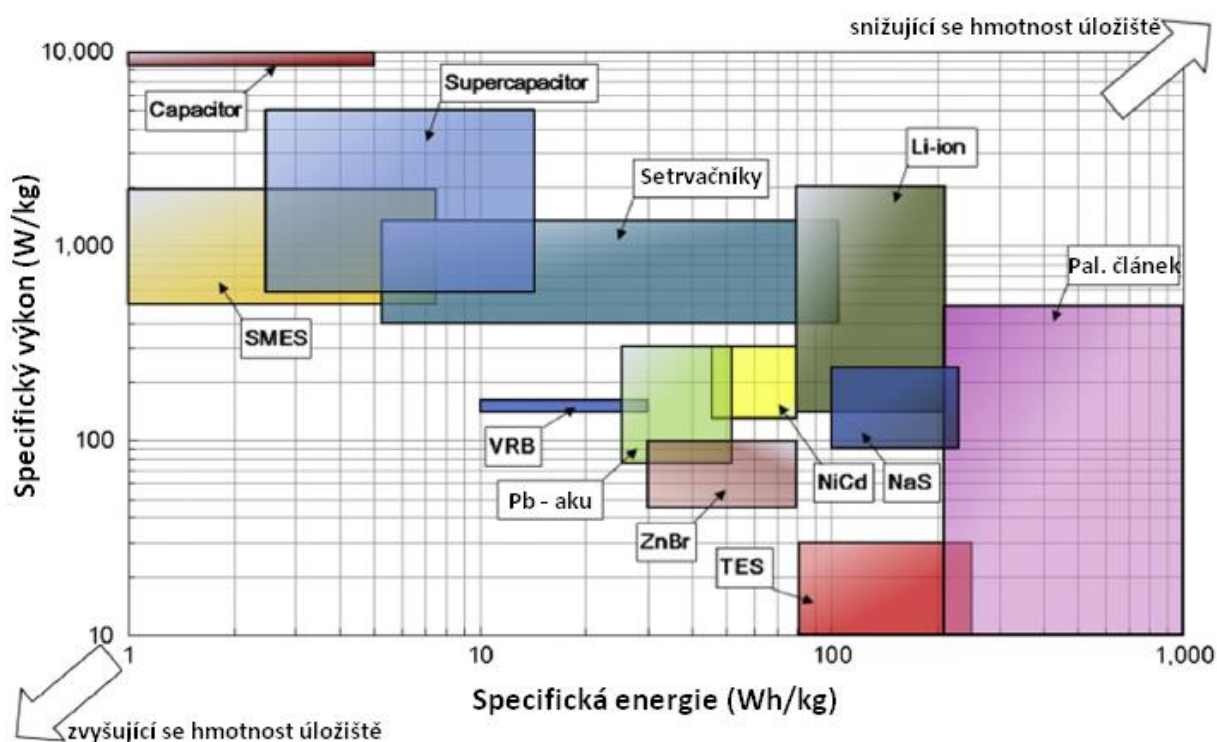
### 3 POROVNÁNÍ AKUMULAČNÍCH SYSTÉMŮ

Pro hodnocení různých variant akumulčních systémů je potřeba zvolit vhodná kritéria. Důležitým parametrem je startovací čas systému (doba náběhu) vzhledem ke schopnosti rychlého zásahu v případě potřeby okamžité dodávky elektrické energie. Rovněž důležitou hodnotící podmínkou je účinnost celého systému. Z ekonomického pohledu je třeba brát v potaz také kritérium investičních nákladů a životnosti akumulčního systému. Právě životnost a s ní spojený termín počet cyklů jsou hlavními faktory, které ovlivňují celkovou investici. Nižší životnost a počet cyklů navyšují náklady na údržbu a náhradní díly. Dále se uvádí tzv. specifický (měrný) výkon a specifická (měrná) energie vztažená na kilogram váhy akumulčního systému, tedy čím vyšší tato energie bude, tím nižší hmotnost systému jako celku bude. Z výše uvedeného plyne, že technologie se budou na základě těchto kritérií lišit a pro určité využití v praxi se budou jednotlivé akumulční technologie díky těmto kritériím efektivně selektovat.

Tab. 3-1 Porovnání technických parametrů vybraných akumulčních technologií, převzato z [15]

Technologie	Výkon (MW)	Doba vybíjení	Samovybití za den (%)	Vhodná skladovací doba	Specifická energie (Wh/kg)	Životnost (rok)	Počet cyklů	Doba náběhu
PVE	100-5000	1-24 h+	Velmi nízké	Hodiny-měsíce	0,5-1,5	40+	10000-30000	Minuty
CAES	5-300	1-24 h+	Nízké	Hodiny-měsíce	30-60	20-40	8000-12000	Sekundy-minuty
Pb	0-40	Sekundy-hodiny	0,1-0,3	Minuty-dny	25-50	5-15	200-1800	Milisekundy
NiCd	0-40	Sekundy-hodiny	0,03-0,6	Minuty-dny	45-80	10-20	2000-3500	Milisekundy
NaS	0-34	Sekundy-hodiny	10-20	Hodiny-měsíce	150-240	10-20	2500-4500	-
Li-Ion	0-50	Minuty-hodiny	0,1-0,3	Minuty-dny	75-200	5-16	1000-20000	Milisekundy
Palivové články	0-60	Sekundy-24 h+	Zanedbatelné	Hodiny-měsíce	800-10000	5-20	1000+	Sekundy
VRB	0,03-3	Sekundy-24 h+	Velmi nízké	Hodiny-měsíce	10-30	5-20	12000+	Milisekundy
ZnBr	0,05-2	Sekundy-10 h+	Nízké	Hodiny-měsíce	30-50	5-10	2000+	Milisekundy
SMES	0,1-10	Milisekundy-8 s	10-15	Minuty-hodiny	0,5-5	20+	20000+	Milisekundy
Setrvačníky	0,1-20	15 s-15 min	100	Sekundy-minuty	5-80	15+	21000+	Sekundy
Super-kapacity	0-0,3	Milisekundy-1 h	10-40	Sekundy-hodiny	0,05-15	10-30	50000+	Milisekundy

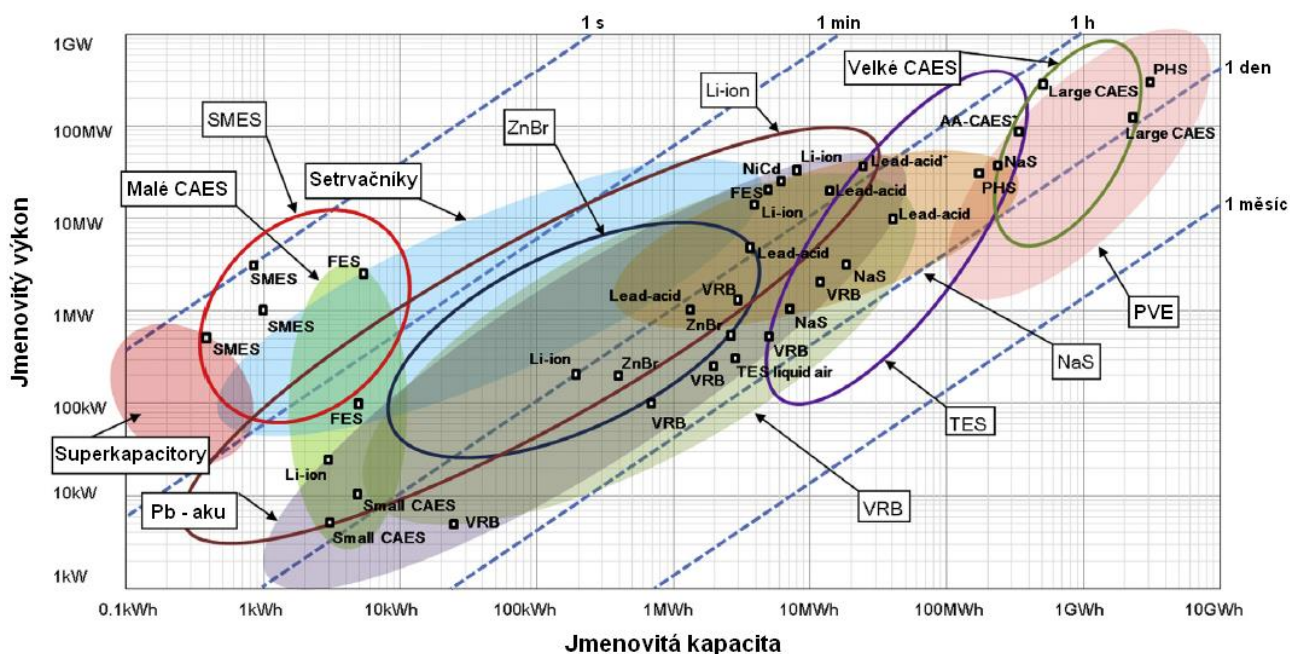
Specifická (měrná) energie a specifický (měrný) výkon jsou důležité indexy, které reprezentují celkovou energii a výkon na jednotku hmotnosti. Obr. 3-1 představuje porovnání měrné energie a měrného výkonu jednotlivých akumulčních technologií. Pro získání určitého množství energie, čím vyšší je měrný výkon a měrná energie, tím nižší bude hmotnost akumulčního systému. Akumulátory vhodné pro aplikace požadující nízkou hmotnost lze nalézt v pravém horním rohu obrázku. Je vidět, že supravodivé cívky SMES a superkapacitory mají vysoký měrný výkon, ale nízkou měrnou energii, neboť obě tyto technologie se vyznačují rychlou dobou odezvy (viz Tab. 3-1), jsou tedy vhodnější pro aplikace s potřebou okamžité dodávky vysokého výkonu. Palivové články a tepelné akumulční úložiště (TES) mají vysokou specifickou energii s nízkým měrným výkonem. Setrvačníky, akumulátory s průtočným elektrolytem a většina konvenčních baterií jsou umístěny na střední úrovni z hlediska měrného výkonu a měrné energie, mohou tedy sloužit v různých oblastech použití akumulace. Lithiové baterie jsou vynikající vzhledem k jejich vyšším hodnotám měrného výkonu i energie, což nabízí rozumné vysvětlení k aktuálnímu širokému spektru v oblasti vývoje a využití těchto lithium-iontových baterií.



Obr. 3-1 Porovnání specifického výkonu a energie akumulčních technologií, převzato z [15]

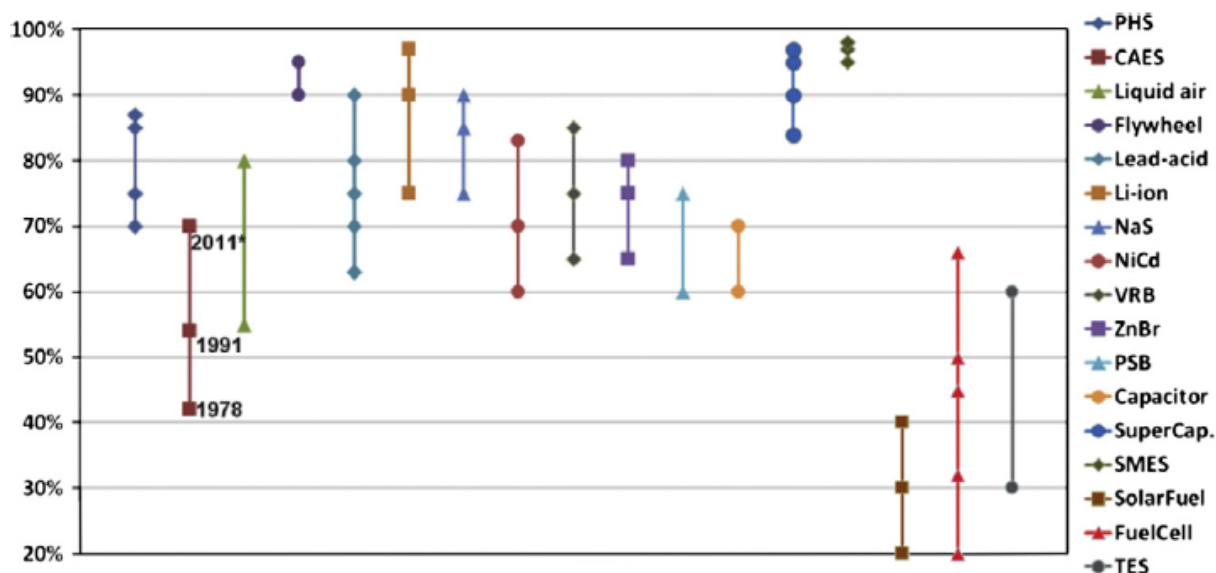
Obr. 3-2 ukazuje srovnání jmenovitých výkonů a jmenovitých energetických kapacit akumulčních technologií. Nominální doba trvání vybíjení při jmenovitém výkonu je rovněž uvedena v rozmezí od sekund do měsíců. Tento graf udává obecné oblasti použití současných akumulčních systémů a také poskytuje naváděcí rozsah pro případné budoucí použití. Dle Tab. 3-1 a Obr. 3-2 mohou být tyto technologie následovně rozříděny podle nominální doby vybíjení při jmenovitém výkonu: (1) doba vybíjení kratší než jedna hodina: setrvačníky, superkapacitory a SMES; (2) doba vybíjení až kolem 10 hodin: nadzemní malé CAES, olověné akumulátory, Li-ion, NiCd a ZnBr; (3) doba vybíjení delší než 10 hodin: PVE, podzemní velké CAES, TES, VRB a palivové články.





Obr. 3-2 Porovnání výkonu a kapacity s dobou vybíjení při jmenovitém výkonu, převzato z [15]

Účinnost cyklu je poměr výstupní elektrické energie k energii do akumulčního systému vstupující. Obr. 3-3 ukazuje srovnání účinnosti cyklu jednotlivých akumulčních technologií. Většina uvedených technologií má střední až vysokou účinnost cyklu (nad 60%), jako PVE, setrvačníky, běžné baterie, akumulátory s průtočným elektrolytem, kapacitory, superkapacitory a SMES. CAES, TES, solární články a palivové články mají dle dosavadních aplikací nízkou účinnost cyklu (pod 60%). Obecně platí, že účinnost se s časem neustále zlepšovala díky úsilí v oblasti výzkumu a vývoje. Například účinnost cyklu u CAES se zvýšil ze 42 % (v roce 1978), 54 % (v roce 1991) na očekávaných 70 % (AA-CAES, projekt ADELE).



Obr. 3-3 Porovnání účinnosti cyklu jednotlivých akumulčních technologií, převzato z [15]

Samovybíjení se vztahuje k rozptylu energie v podobě tepelných přenosových ztrát v tepelných akumulacích, ztrátám způsobeným únikem vzduchu u CAES, elektrochemickým ztrátám v bateriích atd. Úroveň samovybíjení akumulčního systému je jedním z hlavních faktorů při rozhodování v otázce vhodné doby skladování. Dle Tab. 3-1 přečerpávací vodní elektrárny, CAES, NaS baterie, akumulátory s průtočným elektrolytem, palivové a solární články mají velmi malé poměry samovybíjení na den, tím pádem je možné mít u těchto technologií energii dlouhodobě uloženou v řádech až měsíců. Většina tradičních baterií (vyjma NaS) mají denní poměry samovybíjení od 0,03 % do 5 %, mohou být tedy použity pro střednědobé skladování (v řádech dnů). V případě technologií SMES, setrvačníky, kapacitory a superkapacitory, jež mají velmi vysoké denní poměry samovybíjení (od 10 % do 100 %), to znamená, že by mohly zcela uvolnit svou uloženou energii během několika hodin nebo dokonce rychleji. Z tohoto důvodu mohou být použity pouze pro krátkodobé doby skladování (v řádech hodin).

Jak již bylo v úvodu této kapitoly uvedeno, životnost a s ní spojen termín počtu cyklů jsou hlavními faktory, které ovlivňují celkovou investici. Nižší životnost a počet cyklů navyšují náklady na údržbu a výměnu. Tab. 3-1 obsahuje data o životnosti a počtech cyklů různých akumulčních technologií diskutovaných v rámci této práce. Je vidět, že tyto dvě veličiny mají větší či menší spojitost se samotným rozdělením technologií akumulace elektrické energie (tedy i dle členitosti druhé kapitoly této práce). Mechanické systémy akumulace energie obsahující PVE, CAES (resp. AA-CAES) a setrvačníky mají obvykle vysoké počty cyklů (kolem 10000 nebo i více), které hlavně závisí na jejich mechanických komponentech. Počty cyklů u elektromagnetických technologií, jako SMES, kapacitory a superkapacitory, jsou obvykle vyšší než 20000. Z Tab. 3-1 je také zřejmé, že počty cyklů běžných baterií nejsou tak vysoké jako u výše zmíněných technologií, a to zejména z důvodu určité degradace v průběhu provozní doby těchto technologií.



## 4 ZPŮSOBY VYUŽITÍ AKUMULACE V SÍTI

Elektrická soustava jako taková se zabývá výrobou, přenosem, rozvodem, přeměnou a použitím elektrické energie. Na samotné ES jsou kladené následující podmínky:

- spolehlivost dodávky elektrické energie – rozpad soustavy má za následek velké hospodářské škody, jakožto i jiné problémy v samotné ES např. narušení mezinárodní spolupráce, činnost systémových automatik a podobně,
- hospodárnost provozu – jde hlavně o optimální provozování soustavy jako například minimální náklady na provoz,
- dodržování kvalitativních ukazatelů, zejména frekvence v soustavě a napětí v jednotlivých uzlech v předepsaných mezích.

Pomocí akumulace elektrické energie můžeme docílit zvýšení celkové spolehlivosti a kvality, která může být využívána na každé úrovni elektrizační soustavy. Pomocí akumulací na různých úrovních můžeme dle [2] docílit tyto přínosy ES:

- výroba – vyrovnávání zatížení ES, možnost optimálního nasazení zdrojů a výroba s nejnižšími náklady a s nejmenším ekologickým dopadem – PVE,
- přenos – zvýšení dynamické stability sítí, regulace parametrů, dispečerská výkonová rezerva, zvýšení přenosové kapacity (časový posun) - PVE, akumulátory,
- distribuce – zvýšení spolehlivosti a kvality zásobování, zvýšení propustnosti distribučních sítí, odložení investic – akumulátorové stanice,
- odběr – zvýšení spolehlivosti a kvality odebírané elektřiny – setrvačníky, superkapacitory

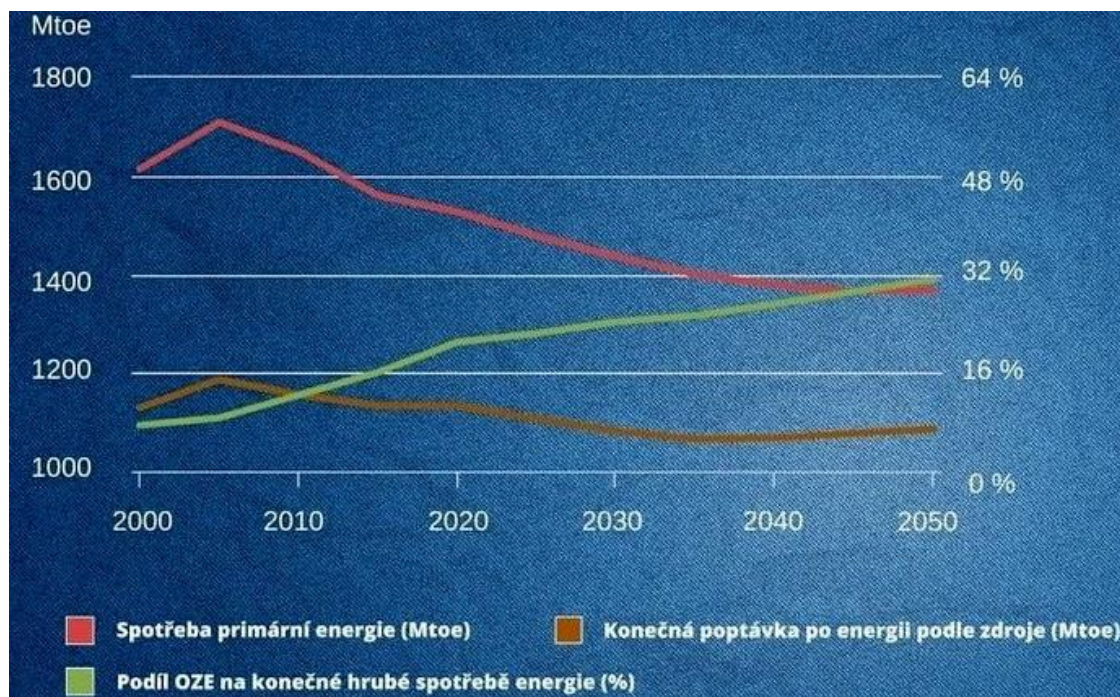
Akumulace elektrické energie je důležitou součástí problematiky nejen v distribuční soustavě ale i u obnovitelných zdrojů energie. Velmi omezená možnost regulace výkonu je nevýhodou u velkých elektráren. Tepelná elektrárna je schopná najet na plný výkon během několika hodin, jaderná elektrárna až v řádech týdnů. Nerovnoměrnost slunečního svitu a větrných podmínek je nevýhodou využívání solární nebo větrné energie. Částečně tyto výkyvy mohou vyrovnávat přečerpávací vodní elektrárny či připravované inteligentní rozvodné sítě, ale to nemusí být vždy dostačující. Proto v době přebytku energie je třeba přebytečnou energii akumulovat pro pozdější využití v době jejího nedostatku. Tím se mohou vyrovnávat rozdíly mezi špičkovým a mimo špičkovým odběrem a zároveň vykrývat energetické špičky v distribuční síti. Ještě potřebnější je akumulace elektrické energie v oblasti ostrovních systémů (systém nepřipojený k elektrorozvodné síti), kde je rozhodujícím faktorem efektivita celého systému. [2],[24]

V jednotlivých státech probíhá regulace elektrizační sítě a akumulace podle přírodních a ekonomických podmínek a struktury energetických zdrojů. Dnes není problém nainstalovat větrné elektrárny s velkými výkony, jenže problémem je jejich zálohování v případě nedostatečného větru. Současná regulace probíhá tak, že na každou hodinu je nasmlouvaná spotřeba a výroba. Odchyly jsou regulovány vyčleněnými regulačními výkony regulovatelného bloku zdroje – regulace primární a sekundární – a větší odchyly a výpadky na základě požadavky dispečinku – regulace terciální. Při OZE je situace složitější, protože je obtížné dopředu smluvit výkony vzhledem k proměnlivosti zdrojů (slunce, vítr) a musí se vždy regulovat celá dodávka, nejen odchylna od nasmlouvaných hodnot. Tím dochází k nadměrnému zatěžování přenosových sítí a zálohových zdrojů. [2],[24]

## 4.1 Akumulace v sítích s OZE

Významným zdrojem výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů je využití sluneční a větrné energie ve fotovoltaických a větrných elektrárnách. Jsou technicky snadno využitelné a jejich potenciální možnosti rozsáhlé. V současnosti nejrychlejším se rozvíjejícím OZE v ČR jsou fotovoltaické elektrárny, které stejně jako elektrárny větrné patří mezi zdroje téměř neregulovatelné, u nichž je výroba elektrické energie závislá na místních těžko předvídatelných meteorologických podmínkách. Jak již bylo řečeno, možnost akumulace elektřiny získané z těchto zdrojů má pro jejich spolehlivý provoz a zálohování velký význam, neboť tyto zdroje vykazují značnou časovou proměnlivost výroby a nespolehlivost dodávky elektrické energie. Při dalším výrazném nárůstu instalovaného výkonu těchto zdrojů v rámci ČR může dojít k ohrožení provozu celé ES. Pokud se problémy s provozem těchto zdrojů nebudou vhodně řešit, například akumulací, bude muset provozovatel soustavy přistoupit v případě potřeby k omezování jejich výroby či dočasnému odpojení. [25]

Díky velkému rozvoji fotovoltaických a větrných elektráren ve světě je potřeba řešit efektivní začlenění zdrojů do elektrizačních soustav (ES). Při takto velkých výkonech jde také o kvalitu elektrické energie, nehledě na skutečnost, že většina připojení obnovitelných zdrojů energie je řešena na napěťové hladině 22 kV, přičemž je předpokládán nárůst připojení do hladiny nízkého napětí (400 V). Je třeba brát zřetel na skutečnost, že se jedná o nestabilní zdroje bez možnosti výrazného centralizovaného řízení. Dobře navržený akumulátor však dokáže vykrývat náhlé poklesy, nebo přebytky elektrické energie. Energetická politika EU je nastavena na energetickou soběstačnost členských států. Do roku 2050 je v plánu pokrývat 32 % spotřeby elektrické energie obnovitelnými zdroji. Bez jakékoliv akumulace není reálné tento výhled uskutečnit. [26]



Obr. 4-1 Spotřeba elektrické energie v EU a podíl OZE na jejím průběhu, převzato z [26]

## Možnosti akumulace elektrické energie pro jednotlivé typy OZE

### Akumulace pro malé vodní elektrárny (MVE)

Malé vodní elektrárny stejně jako velké vodní elektrárny jsou dobře předpověditelné z hlediska průtoku na vodních stavech. Náhlé změny se zde neodehrávají, pouze pokud MVE stojí přímo pod nádrží, která je akumulačního charakteru (s jevem náhlé změny se zde právě počítá a je vysloveně žádaný ze strany regulátora trhu s elektřinou). [4]

### Akumulace pro fotovoltaické elektrárny (FVE)

Pro malé aplikace jsou vhodné elektrochemické systémy, nebo moderní setrvačníky. Mimořádně vhodné je použití elektrochemických akumulátorů v domovních instalacích. Průmyslové aplikace vyžadují komplexnější přístup a návrh. Fotovoltaické elektrárny mají zvýšené požadavky na akumulaci, protože stochastické změny výkonů jsou větší než u kritizovaných větrných elektráren. Na systémy je kladen požadavek okamžité dodávky energie, případně okamžité krytí nadvýroby. Zde není možné použití systémů pracujících ve velkých časových intervalech. Vhodné jsou průtokové akumulátory typu VRB, či Li-ion, nebo stále ještě klasické olověné akumulátory. [15]

### Akumulace pro větrné elektrárny (VTE)

Požadavky pro tento typ akumulace jsou podobné s požadavky pro fotovoltaické elektrárny. Obvykle se jedná o větší celky, než je tomu u FVE. Tyto celky obsahující řadu větrných elektráren nazýváme větrnými parky. Pro ně jsou vhodné menší jednotky založené na systému CAES, přečerpávací vodní elektrárny, nebo vodíkové hospodářství (viz 2.3.1 Vodíková akumulace). Daná vhodnost systému závisí na ekonomických propozicích. [15]

### Akumulace pro elektrárny spalující biomasu

V případě elektráren na biomasu je vhodná akumulace prostřednictvím tepelné energie. Obecně se tato akumulace vyznačuje vysokou mírou efektivity a velké kapacity. Z hlediska biomasy není potřeba velkých akumulátorů elektrické energie, protože sama podstata biomasy je o akumulaci energie. [4]

## 4.2 Akumulace v rámci Smart Grid

Funkční technologie akumulace energie je dalším důležitým prvkem k vybudování inteligentní sítě, takzvané Smart Grid, která představuje formu elektrické sítě s využitím digitálních technologií. Inteligentní síť dodává elektřinu od dodavatelů ke spotřebitelům s podporou obousměrné digitální komunikace, což šetří energii, snižuje náklady a zvyšuje spolehlivost a transparentnost celého procesu. Je to kombinace běžné elektrické sítě a informační sítě s inteligentním měřením a řízením. Smart Grid technologie jsou podporovány mnoha vládami jako způsob řešení problémů energetické nezávislosti, globálního oteplování a otázky energetické bezpečnosti. Umožňuje dynamicky reagovat na změny v síti pomocí použití snímání, měření a regulace zařízení na výrobu elektřiny, přenosu, distribuce a spotřeby v částech elektrické sítě. Jinak řečeno, Smart Grid může reagovat na události, které se vyskytují v jakémkoliv místě soustavy, ať už u výroby, distribuce či spotřeby elektrické energie. [2]

Významným přínosem těchto inteligentních sítí je decentralizace výroby energie, přičemž jednotliví spotřebitelé mohou vyrábět elektrickou energii přímo v místě jejich spotřeby a v případě potřeby i dodávat do ES. Smart Grid umožňuje připojení k síti z distribuované výroby energie (z fotovoltaických článků, malých větrných turbín, malých vodních elektráren, nebo kombinované výroby tepla a elektřiny v budovách). To vyžaduje vybudování sítě a skladování elektrické energie pro distribuované vyrovnávání zátěže. Distribucí energie na menší celky je možné v některých případech omezit vliv systémových poruch, jako např. kaskádový rozpad soustavy. Využitím sítí Smart Grid se očekává zvýšení efektivity a spolehlivosti soustavy jako takové, jejichž přínosem bude úspora investic a snížení emisí CO<sub>2</sub>. [2]

### 4.3 Akumulace k udržení stability sítě

Rozmach obnovitelných zdrojů energie klade zvyšující se požadavky na udržení stability sítě a plnění síťových parametrů. Aby rozvodná síť zůstala stabilní, je nutné toto kolísání vyrovnat, protože množství energie dodávané a odebírané ze sítě musí být v každém okamžiku stejné, tedy vyvážené. O zmíněný stav ES se starají akumulační elektrárny s velmi krátkou dobou náběhu, jejichž výkon lze operativně měnit a přizpůsobovat aktuálním podmínkám v rozvodné síti. V současné době jsou nejlepším řešením přečerpávací vodní elektrárny (viz 2.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny). Při přebytku energie v ES je elektrickými čerpadly přečerpávána voda potrubím do horní nádrže, odkud se při zvýšené poptávce po elektrické energii řízeně vypouští do spodní nádrže, a přitom pohání turbínu. V současnosti mají přečerpávací elektrárny v ČR celkový instalovaný výkon asi 1175 MW. [27]

Pro vyrovnávání je možné využít i operativně spouštěné menší elektrárny plynové a uhelné, ale také jejich možnosti jsou omezené, zejména při trvalém preferování kogenerační výroby tepla a elektřiny. Potřeba elektrického vyrovnávacího výkonu pro udržení stability rozvodné sítě s rostoucím podílem větrné a fotovoltaické energie silně roste a již v současnosti jsou při určitých povětrnostních situacích disponibilní kapacity vyrovnávacích elektráren téměř vyčerpány. Proto se v poslední době vrací ke starším projektům skladování energie, jako jsou např. tlakovzdušné akumulační elektrárny (CAES, resp. AA-CAES) pracující v principu podobně jako přečerpávací vodní elektrárny. Příkladem může být německý projekt ADELE pracující na principu AA-CAES. Ve světě se mj. čím dál častěji využívá velkých bateriových bloků. Obvykle se jedná o technologie obsahující lithiové akumulátory, olověné akumulátory (postupně přechází do pozadí), NaS akumulátory a v poslední době akumulátory s průtočným elektrolytem (zejména VRB, ZnBr). Velké projekty již v provozu nebo i plánované jsou uvedeny v jednotlivých podkapitolách o těchto technologiích v rámci této práce. [15],[27]

## 5 POPIS ZADANÉ SÍTĚ

V následující kapitole bude popsána a analyzována zadaná síť společností EON Distribuce, a.s. Jedná se o síť propojující přípojná místa v obci Křižanovice u Vyškova. Obec se nachází v Jihomoravském kraji asi 3 km severovýchodně od okresního města Vyškov. Síť je na napěťové hladině 400 V a je napájena z jedné trafostanice 22/0,4 kV. Z transformátoru vedou dva hlavní vývody, které se následně v kabelové variantě spojují do kruhu. Stávající venkovní vedení v obci se skládá z kombinace izolovaných vodičů AES a starších AlFe lan. Do budoucna se uvažuje přeložení stávajících vedení do kabelu. Síť obsahuje celkově 67 přípojných míst, z čehož u více než 90 % přípojek převažují jističe s jmenovitým proudem 25 A. Zřídka se objevují přípojky s jističem o jmenovitém proudu 32 A, resp. 40 A. Na Obr. 5-1 je možno vidět detail části zadané sítě obce Křižanovice u Vyškova ve stávajícím stavu. Výřez schématu sítě byl vyexportován pomocí softwaru PAS Daisy Bizon.



Obr. 5-1 Detail části zadané sítě obce Křižanovice u Vyškova

### 5.1 Vytvoření modelu pro výpočet ustáleného chodu sítě

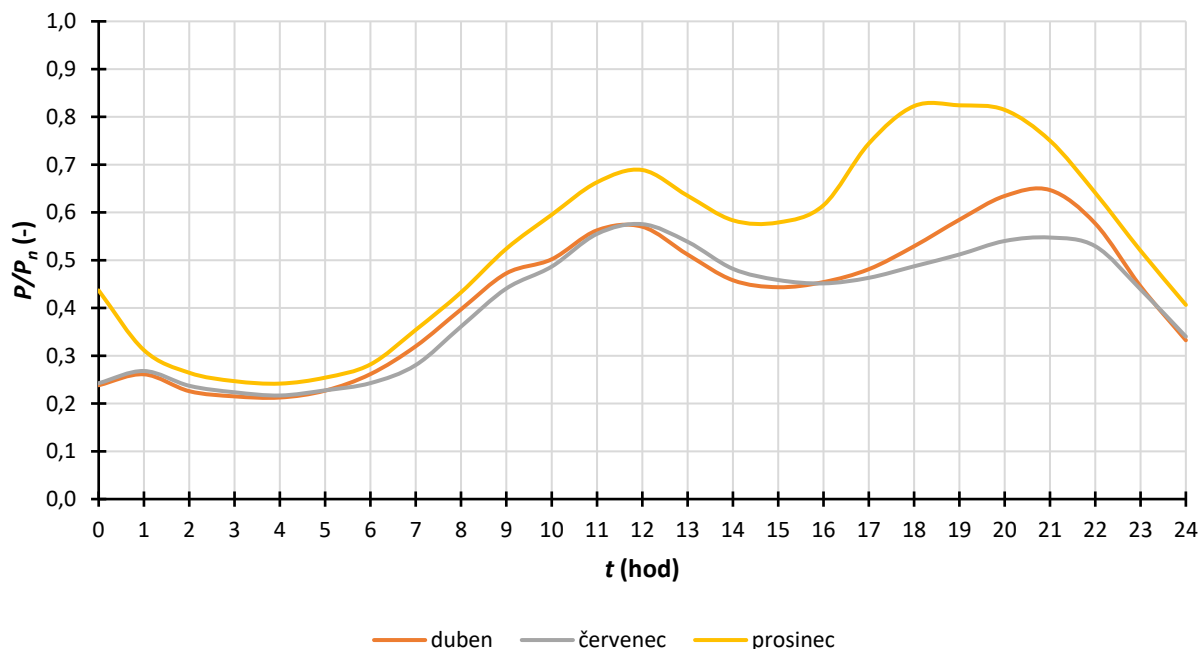
Mezi hlavní body této práce patří integrace decentrálních zdrojů elektrické energie (zde fotovoltaických elektráren) do výše zmíněné sítě. Z pohledu provozovatele distribuční soustavy je určitým cílem analýzy zjistit, jestli síť bude schopna vést případné změny výkonů v důsledku závislosti výroby elektrické energie decentrálních zdrojů na počasí a tím tedy i maximální zatížení vedení. Zároveň je třeba nadále zajistit charakteristiky napětí v distribuční soustavě v daných mezích jako doposud. V případě, že výstupy naznačí, že vedení či zařízení v kompetenci provozovatele již nebude v závislosti na výhledový stav vyhovovat, bude muset dojít k rozvoji nevyhovujících částí, tím tedy i zvýšení investic. Analýza vlivu plošné instalace FVE na provoz sítě bude popsána a porovnávána primárně z hlediska udržení hodnot napětí u všech přípojek ve stanovených mezích ( $1,1 - 0,9U_n$ ). Dále budou pozorovány průběhy proudů v místě za distribučním transformátorem 22/0,4 kV, a to zejména se zaměřením na možné přetoky činných výkonů (respektive proudů) do nadřazené soustavy (zde VN).



Vzhledem k výše uvedeným podmínkám byl autorem této práce vytvořen pomocí softwaru Microsoft Excel univerzální model, který po zadání potřebných parametrů je schopen určit napětí pro jednotlivá přípojná místa a proudy, které protékají zadanou sítí. Vytvořený model uvažuje určitá zjednodušení jako například uvažování pouze podélných parametrů náhradního schématu. Dále se uvažuje pouze jeden typ vedení či kabelu propojující distribuční transformátor a jednotlivé přípojky, tím pádem se neuvažují krátké úseky vedení či kabelů o nižších průřezech, neboť jejich vliv na hodnotu napětí není tak markantní v porovnání s pátevní sítí, jejíž délka a tím i úbytek napětí na těchto úsecích je podstatně vyšší. Určitý vliv na výpočet ustáleného chodu sítě mají účinnky odběrů jednotlivých domácností či účinnky výroby výroben. Ve vytvořeném modelu se uvažuje shodný účinnky odběrů, který je možno podle zadání nastavit. Pro scénáře uvedené v rámci této práce byl zvolen účinnky odběrů shodně 0,8. Účinnky výroben se uvažuje shodně 1, jedná se tedy o čistou dodávku činného výkonu. Devizou vytvořeného modelu je možnost vybrat jeden ze tří měsíců, pro který budou následně zobrazeny požadované průběhy.

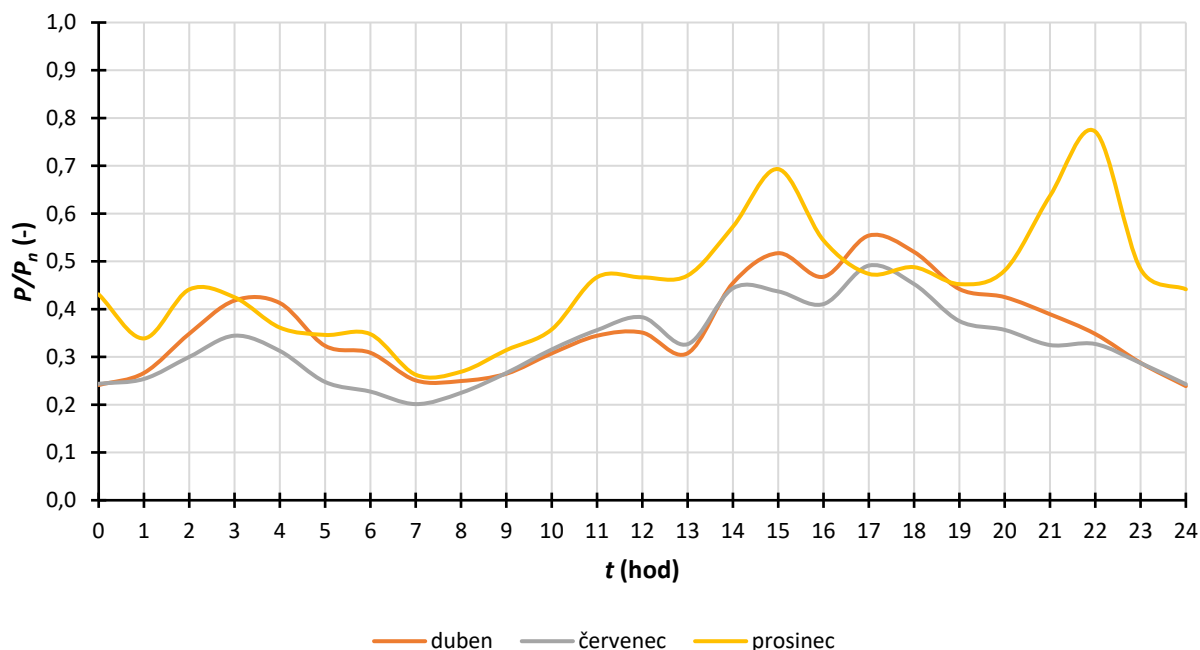
Po dohodě s vedoucím práce byly vybrány měsíce – duben, červenec, prosinec. Duben byl zahrnut zejména z důvodu už poměrně vysoké výroby elektrické energie, a přitom stále ještě vyšší spotřeby než v letních měsících. Červenec je logicky zahrnut z důvodu nejvyšší výroby elektrické energie v průběhu roku a prosinec naopak z důvodu nejvyšší spotřeby. Výše odběrů v tomto modelu jsou závislé na hodnotách normalizovaných typových diagramů dodávky, které byly získány od Operátora trhu s elektřinou (OTE, a.s.). Hodnoty jsou na oficiálních stránkách OTE, a.s. uvedeny pro každou hodinu a den roku 2016. Jelikož spotřeba je velmi závislá na aktuální teplotě, je logické, že se hodnoty mění pro danou hodinu v průběhu stejného měsíce. Pro lepší vypovídající hodnotu byly informace o dodávce pro určité hodiny během stejného měsíce zprůměrovány.

#### Domácnost - odběr bez tepelného využití elektřiny - TDD č. 4



Obr. 5-2 Typové diagramy dodávky pro odběr bez tepelného využití elektřiny

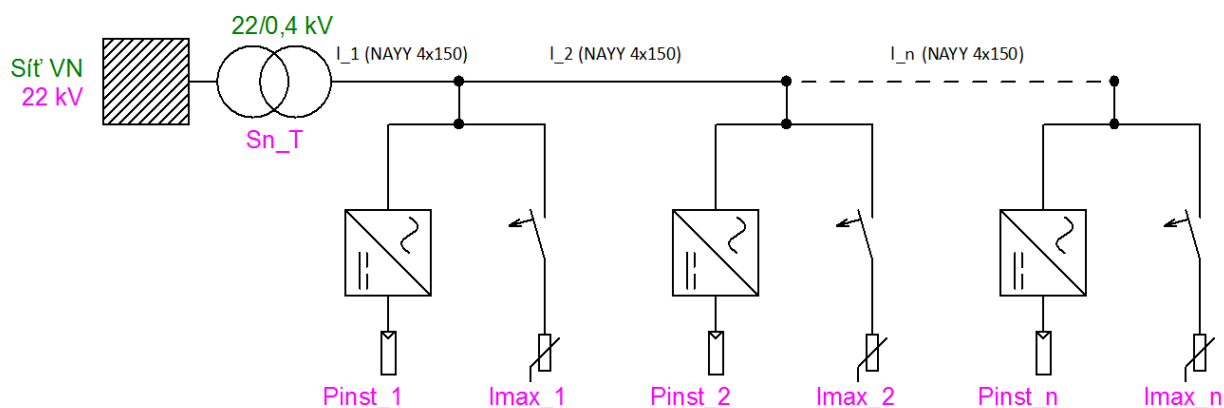
## Domácnost – odběr s akumulčním spotřebičem - TDD č. 5



Obr. 5-3 Typové diagramy dodávky pro odběr s akumulčním spotřebičem

Tyto hodnoty platí pro všechny odběry v dané síti, z toho plyne že se jednotlivé odběry budou lišit na základě výše jmenovitého proudu jističe a účinku odběru. Dále v souvislosti s typovými diagramy dodávky je vhodné dodat, že uživatel modelu má možnost výběru mezi TDD č. 4 (Domácnost – odběr bez tepelného využití elektřiny) a TDD č. 5 (Domácnost – odběr s akumulčním spotřebičem). Obecně normalizované typové diagramy dodávky jsou charakterizovány jako součet 8760 relativních hodnot průměrných hodinových odběrů v roce, vztažených k hodnotě ročního maxima průměrných hodinových odběrů (určeného z měření vzorků TDD). Jak již bylo výše nastíněno, model dále umožňuje volbu velikosti jmenovitých proudů jističe (ze třech možných – 25 A, 32 A a 40 A). Nemalý podíl na výsledných hodnotách napětí má úbytek napětí na napájecím distribučním transformátoru. Z tohoto důvodu byly do modelu vytvořeny funkce, které umožňují jak volbu distribučního transformátoru dle jmenovitého výkonu (160 kVA nebo 400 kVA), tak možnost změny odboček (naprogramováno 5 stupňů - +5 %; +2,5 %; 0 %; -2,5 % a -5 %) na straně vyššího napětí, které rovněž ovlivní hodnotu sekundárního napětí. Parametry pro tyto transformátory byly použity z typové tabulky transformátorů ze softwaru PAS Daisy Bizon. Jelikož část sítě, jenž bude analyzována, obsahuje na dlouhém paprskovém vedení 33 odběrných míst, předpokládá se využití zejména záporných stupňů pro prosincový výpočet, který je charakteristický vyšším odběrem. Pro dubnový a červencový výpočet se očekává využití základní 0% stupně odbočky transformátoru, neboť odběr nebude tak vysoký, naopak v síti naroste hodnota činného výkonu z FVE.

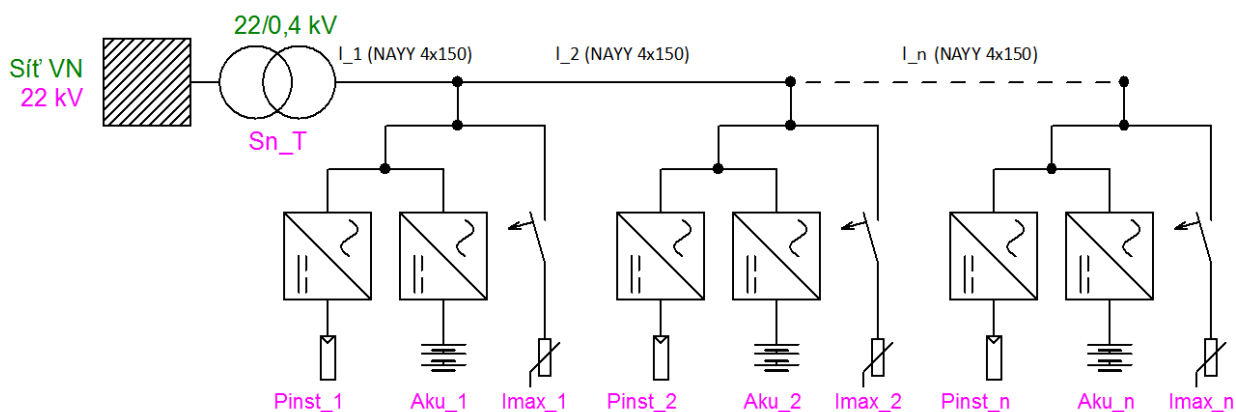
Při programování vlivu plošné instalace FVE na síť dle výchozího schématu (viz Obr. 5-4 vytvořený pomocí softwaru ProfiCAD) bylo využito následujících úvah. Průběhy výroby elektrické energie z FVE jsou uvedeny jako při ideální výrobě za absolutně jasného dne. To znamená, že nejsou uvažovány okamžité výkyvy výroby, kterými jsou tyto zdroje energie charakteristické. Výhoda této úvahy spočívá ve skutečnosti, že se do sítě dodá maximální možná výroba, kterou je schopna výrobní v daném místě generovat. Do sítě se ve skutečnosti dodá rozdíl, který je charakterizován jako rozdíl výše uvedené výroby z FVE a aktuální spotřeby, která je v dané přípojce právě ze sítě odebírána. Tím pádem je zde předpokladem fakt, že dochází k okamžité spotřebě vyrobené elektrické energie z FVE. Model rovněž nabízí možnost variability vstupních údajů instalovaného výkonu výroben, počítá s jakoukoliv hodnotou instalovaného výkonu, kterou uživatel zadá. Po zadání hodnot těchto výkonů je model schopen vypočítat možnou výrobu elektrické energie pro zadanou lokalitu, která vychází z hodnot generovaných softwarem PVGIS, na jejichž základě byly vytvořeny přepočty použitelné právě pro možnosti modelu tyto výroby určit. Na základě komunikace s konzultanty ze společnosti E.ON byla doprogramována funkce, která umožní zadat různé instalované výkony výroben u každého druhého odběrného místa, což přinese větší variabilitu a různorodost při tvorbě scénářů.



Obr. 5-4 Výchozí schéma pro výpočet ustáleného chodu sítě při instalaci FVE

Dalším významným krokem byla tvorba algoritmů pro výpočet vlivu plošné instalace FVE společně s instalací akumulace dle výchozího schématu (viz Obr. 5-5). Celý vývojový diagram sloužící k tvorbě algoritmů pro výpočet jednotlivých parametrů, v rámci analýzy s připojenou akumulací, je uveden v příloze C (viz Obr. C-1). Pro přehlednost diagramu není zahrnuta funkce omezené kapacity akumulátoru, jejíž funkce bude v textu dále popsána. Jak se může očekávat, i v tomto případě bylo třeba stanovit limity a zjednodušující faktory, jejichž pomocí bylo možné algoritmus na této úrovni vytvořit, a přitom nedojde k takovému zkreslení výstupů, které by významně ovlivnilo následnou analýzu. Pokud uživatel zapne funkci pro integraci akumulace, tak se následně do imaginárního akumulátoru akumuluje energie v případě, že výroba opět převyšuje spotřebu elektrické energie. To znamená, že difference výroby a spotřeby, která byla v předchozím případě dodávána do sítě, je zde dodávána do akumulátoru. Naopak pokud spotřeba převyšuje výrobu, tak je energie primárně odebírána z akumulátoru. U zmíněného akumulátoru není nastavena limitní funkce, která by omezovala odběr energie. U reálných instalací je tato možnost vždy stanovena, neboť hloubka vybití zásadně ovlivňuje životnost (čím vyšší hloubka vybití, tím nižší počet cyklů akumulátor zvládne).





Obr. 5-5 Výchozí schéma pro výpočet ustáleného chodu sítě při instalaci FVE včetně akumulace

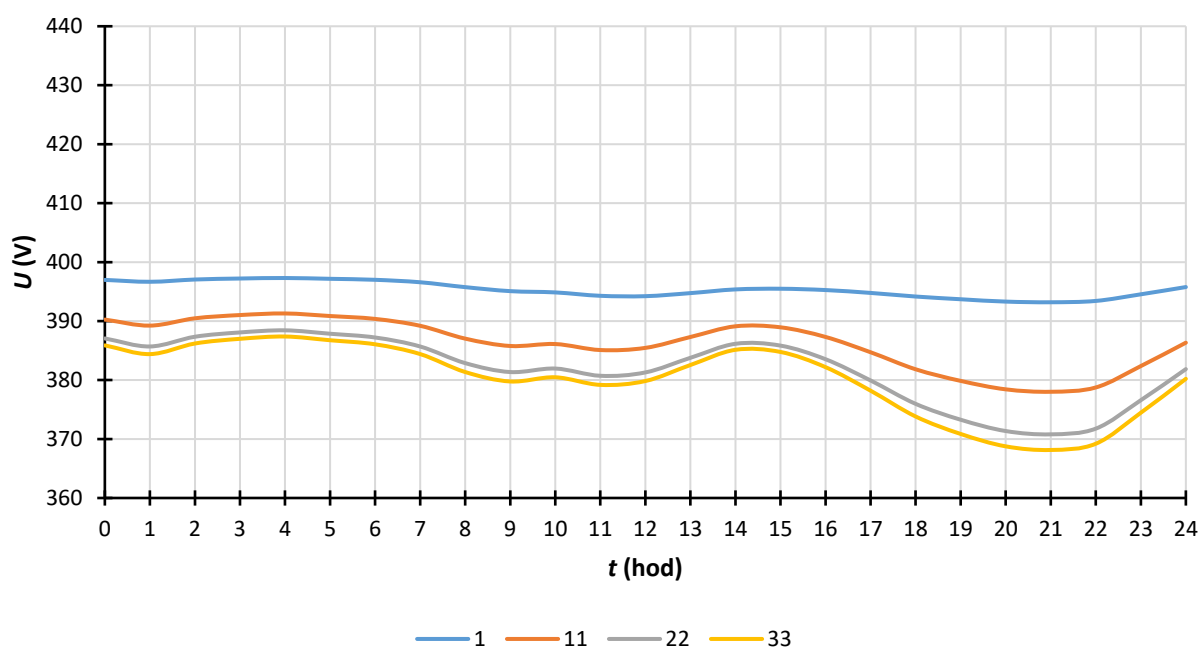
Naopak model nabízí nastavení maximální kapacity, kterou je akumulátor schopen pojmout. Tato funkce se reguluje pomocí změny měrné kapacity akumulátoru, jenž je popsána jako poměr energie, kterou je možno do akumulátoru dodat a instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny. Minimální hodnota měrné kapacity akumulátoru je 1,25 Wh/Wp. Tato hodnota je používána jako minimální v případě, že jsou v systému použity akumulátory využívající technologie umožňující využít vysoký počet hlubokých vybíjecích cyklů bez výrazné ztráty kapacity (zejména akumulátory na bázi lithia – Li-Ion, LiFePo<sub>4</sub>, LiFeYPO; neplatí pro akumulátory na bázi olova včetně gelových, AGM, Ni-MH, Ni-Fe atd.). Dle [28] se tedy využívá minimální měrné kapacity akumulátoru 1,75 Wh/Wp. Na druhou stranu model neumožňuje změnu parametru elektrického výkonu akumulace. Hodnota elektrického výkonu akumulace vždy odpovídá instalovanému výkonu FVE, jako omezení tedy bude využíváno výše zmíněné měrné kapacity akumulátoru. Na základě konzultace s doc. Mastným se obecně užívá hodnoty 2, tedy číselná hodnota kapacity ve watthodinách (Wh) by měla být dvojnásobná oproti číselné hodnotě instalovaného výkonu fotovoltaické výroby, jehož užívanou jednotkou je watt peak (Wp). Pokud se vrátíme k vysvětlení principu chování modelu v případě nedostatečně nabitého akumulátoru, to znamená, že naakumulovaná energie nestačuje, tak zbytkový rozdíl, který je třeba ještě dodat, je již odebírán ze sítě. Jestliže v akumulátoru již není nashromážděna žádná energie, pak je energie plně dodávána ze sítě do odběrného místa.

## 6 ANALÝZA VLIVU PLOŠNÉ INSTALACE FVE

V následující kapitole bude na základě předchozích kapitol analyzována plošná instalace fotovoltaických výroben do zadané sítě. Bude uvažováno několik různých scénářů, jejichž rozdíly budou následně popsány a vyhodnoceny. Jak již bylo v přechozí kapitole nastíněno, výchozím bodem bylo zhodnotit měsíce, jež jsou charakteristické maximálním odběrem, výrobou a určitou kombinací těchto možností. V rámci této práce byly po dohodě s vedoucím práce vybrány následující měsíce – červenec (maximální výroba), prosinec (maximální odběr) a duben (kombinace vyššího odběru v pozdější hodinách než v případě července, a přitom již významná výroba v průběhu dne). Dalšími možnými scénáři budou případy, kdy výroba bude v každém odběrném místě a v každém druhém odběrném místě. Pro názornost výkyvů napětí v jednotlivých odběrných místech budou zhodnoceny rovněž scénáře s různými instalovanými výkony FVE. Veškeré analýzy budou zpracovány pro výhledový stav v souladu s dokumentem NAP SG, během kterého se již předpokládá kabelové propojení. V tomto případě bylo tedy schéma sítě přeloženo do hliníkového kabelu typu NAYY 4x150 mm<sup>2</sup> ( $R_k = 0,206 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ;  $L_k = 0,23 \text{ mH} \cdot \text{km}^{-1}$ ) [29] pro hlavní okruh propojující odběrná místa (viz Tab. B-1).

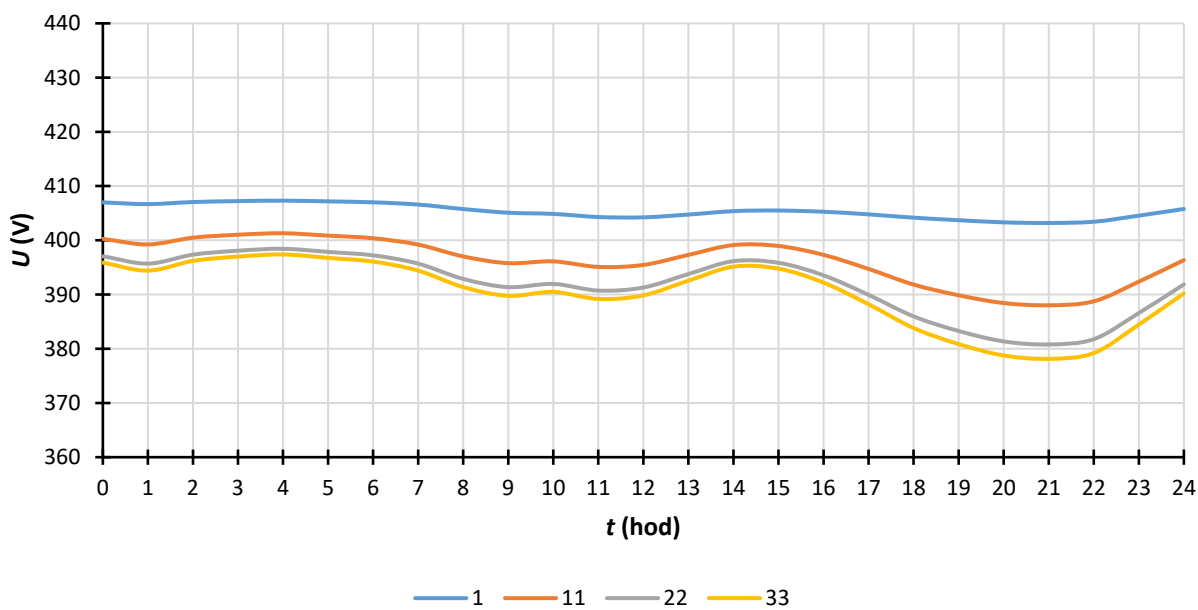
### 6.1 Červencový stav – plošná instalace FVE

Jak již bylo v rámci práce zmíněno, tento červencový stav byl vybrán na základě největší výroby v průběhu roku. Vytvořený model pracuje s průběhy výroby elektrické energie z FVE za absolutně jasného dne. Tím pádem nejsou uvažovány okamžité výkyvy výroby jako důsledek změn počasí (např. polojasný, či zatažený den), díky kterým jsou tyto zdroje označovány jako intermitentní. Na základě tohoto předpokladu se bude generovat maximální možná výroba a do sítě bude dodán rozdíl, který je charakterizován jako rozdíl výše uvedené výroby z FVE a aktuální červencové spotřeby pro danou hodinu, která je v dané přípojce právě ze sítě odebírána. V Tab. A-1 jsou obsaženy zadané parametry jednotlivých odběrných míst pro částečnou instalaci FVE (viz Příloha A). Porovnány budou stavy s částečnou plošnou instalací (do každého druhé odběrného místa bude připojena výrobní) a celoplošnou instalací FVE do každého odběrného místa.



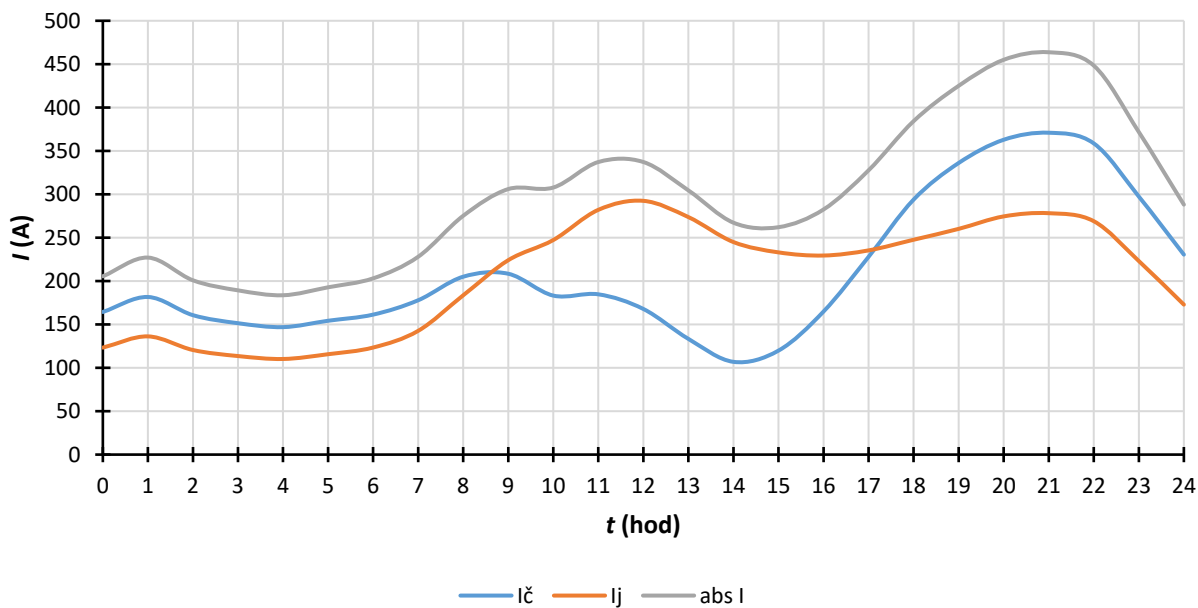
Obr. 6-1 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (odbočka 0 %)

Obr. 6-1 zobrazuje graf průběhů vypočtených napětí u vybraných odběrných míst při částečné instalaci FVE do zadané sítě. Jak je ve zmíněném grafu vidět, již první odběrné místo nedosahuje v průběhu celého dne jmenovité hodnoty napětí. Tato skutečnost je dána velkým úbytkem napětí na transformátoru a také nastavenou základní odbočkou distribučního transformátoru (0 %). Pokud by se odbočka změnila na -2,5 % nebo -5 %, pak by následně došlo k vzrůstu napětí ve všech odběrných místech, viz Obr. 6-2. Pro názornější výstupní informaci ze zobrazených průběhů napětí a proudů bude dále nastavena odbočka distribučního transformátoru -2,5 %.



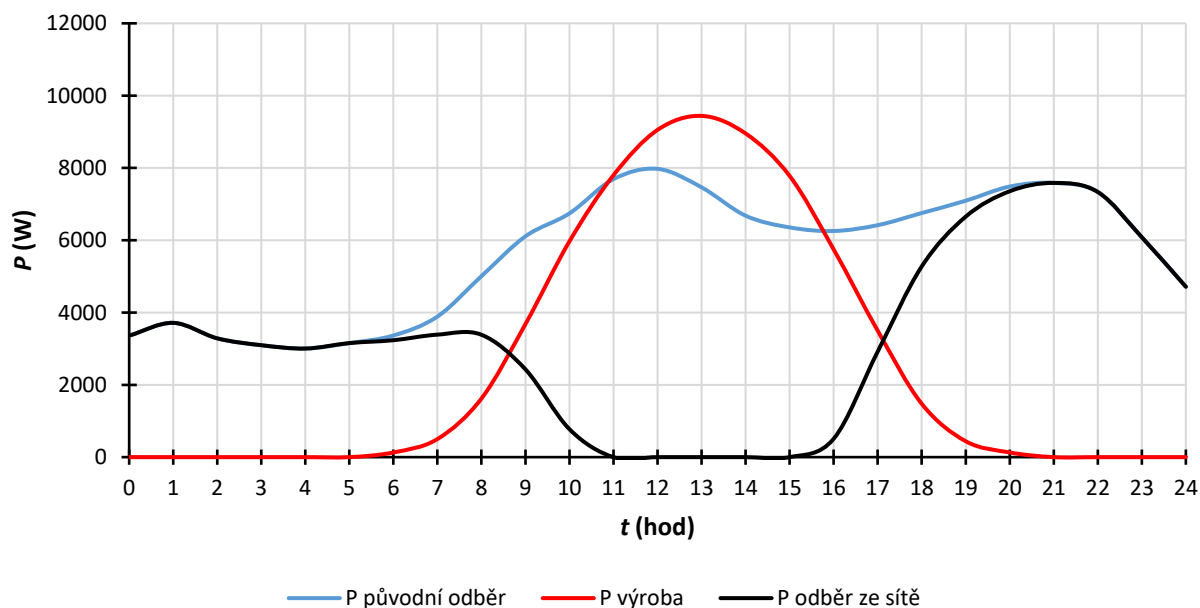
Obr. 6-2 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (odbočka -2,5 %)

Dle Tab. A-1 a průběhů v Obr. 6-1 a Obr. 6-2 je patrné, že tvary průběhů napětí v jednotlivých OM jsou velmi podobné, přestože je fotovoltaická výroba v každém druhém OM. Viditelné rozestupy mezi průběhy jsou dány zejména kumulující se úbytky napětí na kabelech, které odběrná místa spojují.

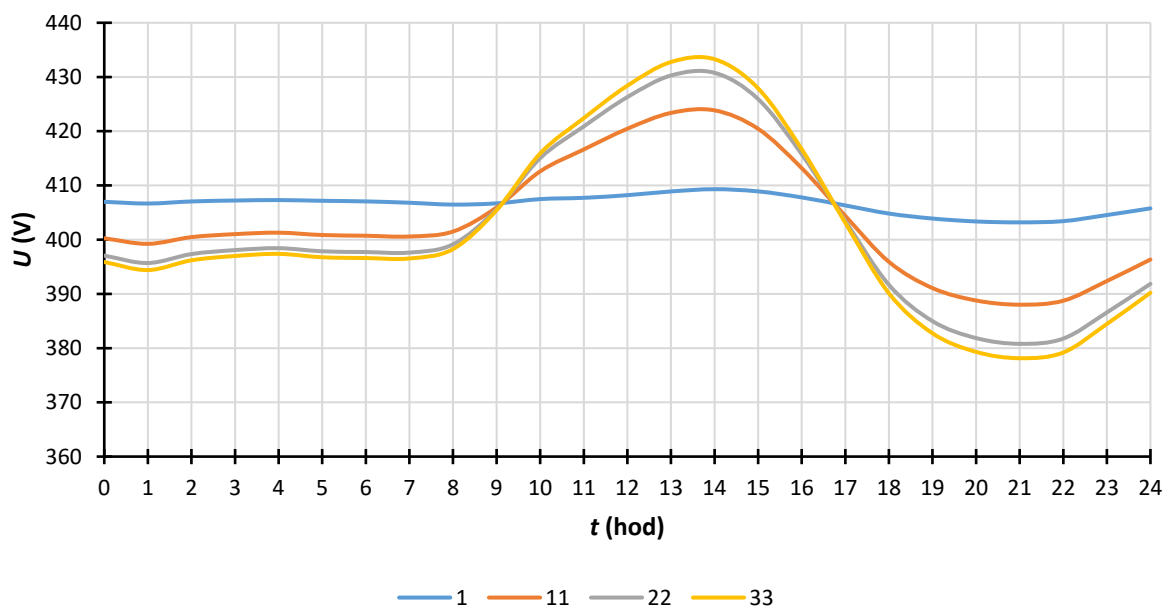


Obr. 6-3 Červencové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE

Obr. 6-3 zobrazuje proudy tekoucí v místě distribučního transformátoru (na straně nn). Při porovnání s Obr. 5-2 je vidět, že průběhy proudů korelují tvar typových diagramů dodávky. Jen činná složka proudu se v polovině dne vychyluje, neboť právě ve 12. a 13. hodině nastávají špičky výroby z FVE. Tudíž pokud výroba z FVE převyšuje aktuální odběr, dochází k dodávce činné složky proudu (resp. výkonu) do sítě. Jelikož činná složka proudu v místě distribučního transformátoru nedosahuje ani v oblasti poledne záporných hodnot (což by znamenalo přetok do vyšší napěťové hladiny), znamená to, že v síti je ještě rezerva pro další instalace, neboť odběry zvládají generovanou činnou složku pojmout. S tím souvisí Obr. 6-4, který zobrazuje interval od 11 do 15 hod, kdy uvedené odběrné místo 1 neodebírá činnou složku výkonu ze sítě, neboť ji čerpá z generující výroby. Zároveň nedochází dle Obr. 6-1 k přepětí, které bude očekáváno spíše v případě celoplošné instalace a s vyššími instalovanými výkony FVE.



Obr. 6-4 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a  $P_{\text{inst}} = 10 \text{ kWp}$

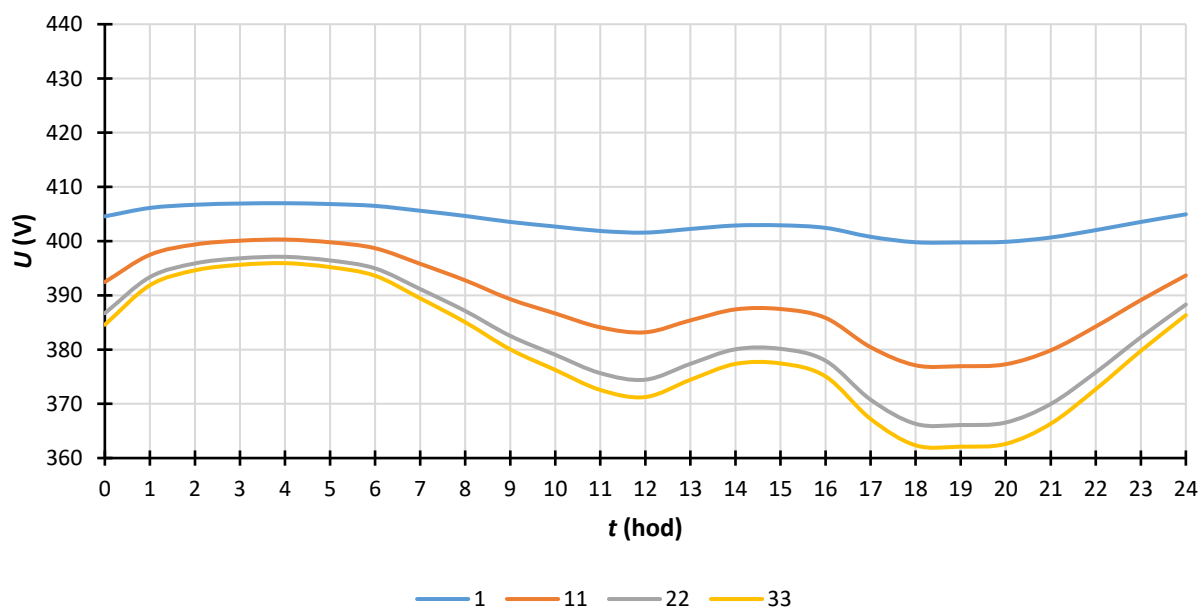


Obr. 6-5 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE o  $P_{\text{inst}} = 20 \text{ kWp}$

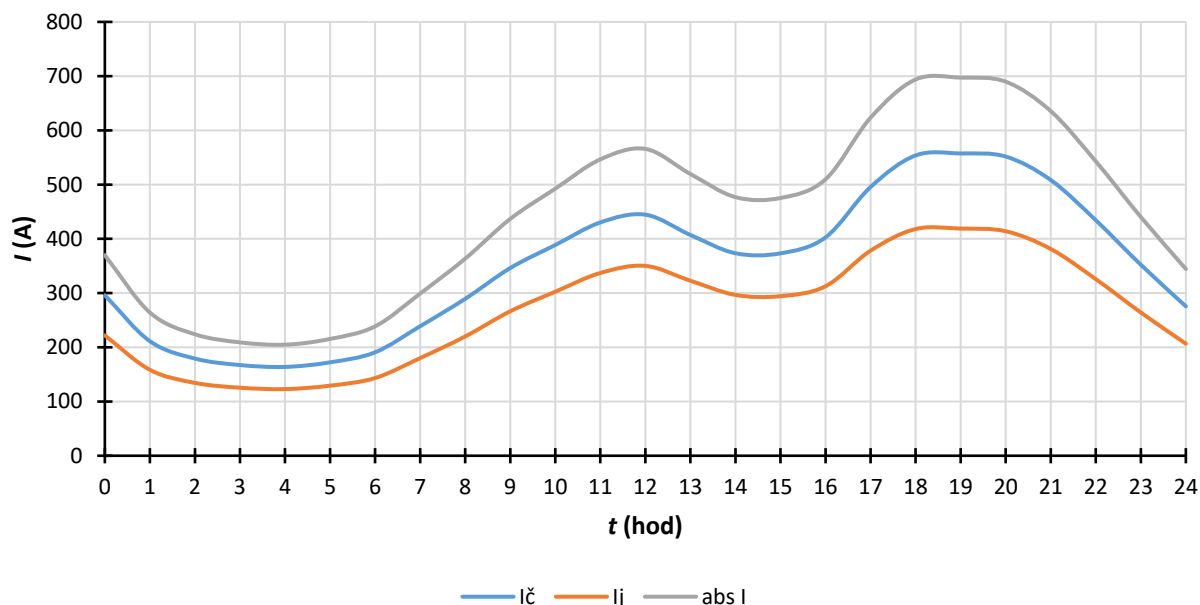
Obr. 6-5 zobrazuje červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE o instalovaném výkonu 20 kWp s nastavenou odbočkou distribučního transformátoru -2,5 %. Právě toto nastavení se již blíží tzv. meznímu stavu, kdy napětí v době špičky výroby dosahuje limitní hranice 110 % jmenovitého napětí. Pokud by došlo k určitému odlehčení některých významných odběrů, například u odběrných míst s vyšší hodnotou rezervovaného příkonu (na základě velikosti jističe), pak by tuto hranici mohlo i překonat a tím negativně ovlivnit elektrické spotřebiče a zařízení, které by na tomto napětí byly připojeny. Dále je patrné, že pokud dochází k vyšší dodávce činné složky proudu (resp. výkonu) do sítě v případě celoplošné instalace FVE, pak napětí roste s rostoucí vzdáleností od napájecího místa (zde tedy distribučního transformátoru). Samozřejmě je nutné podotknout, že se jedná o předdimenzovaný stav, nicméně vyhovuje k účelné demonstraci možných přepětí a výkyvů napětí v průběhu dne.

## 6.2 Prosincový stav – plošná instalace FVE

Následující podkapitola bude popisovat prosincový stav, u něž bude problematická otázka podpětí, jelikož ve večerních hodinách hodnoty napětí budou klesat ke spodní limitní hranici z důvodu vysokých odběrů ze sítě. To potvrzuje Obr. 6-6, na kterém je vidět, že s rostoucí vzdáleností od napájecího místa klesá napětí. Zejména ve večerních hodinách hodnoty napětí dosahují necelých 360 V. Pokud by byla nastavena základní odbočka distribučního transformátoru či vyšší, pak by nastalo v tomto časovém intervalu podpětí. Hodnoty výroby v tomto případě nijak tuto skutečnost neovlivní, neboť FVE v tyto hodiny nevyrábí. I v případě připojení akumulace by se nedosáhlo zvýšení průběhu v tomto časovém intervalu, protože prosincová výroba z FVE je v porovnání s červencovou či dubnovou zanedbatelná. Smysl by eventuálně mělo skladovat veškerou vyrobenou energii v průběhu dne a posunout využití této akumulované energie právě do problematického intervalu. V tomto případě by však byla potřeba významného instalovaného výkonu, z něhož by bylo možné vyrobit více elektrické energie, kterou by bylo možné uskladnit a v pozdějších hodinách využít. Reálně je však tato varianta ekonomicky z hlediska návratnosti nemožná.

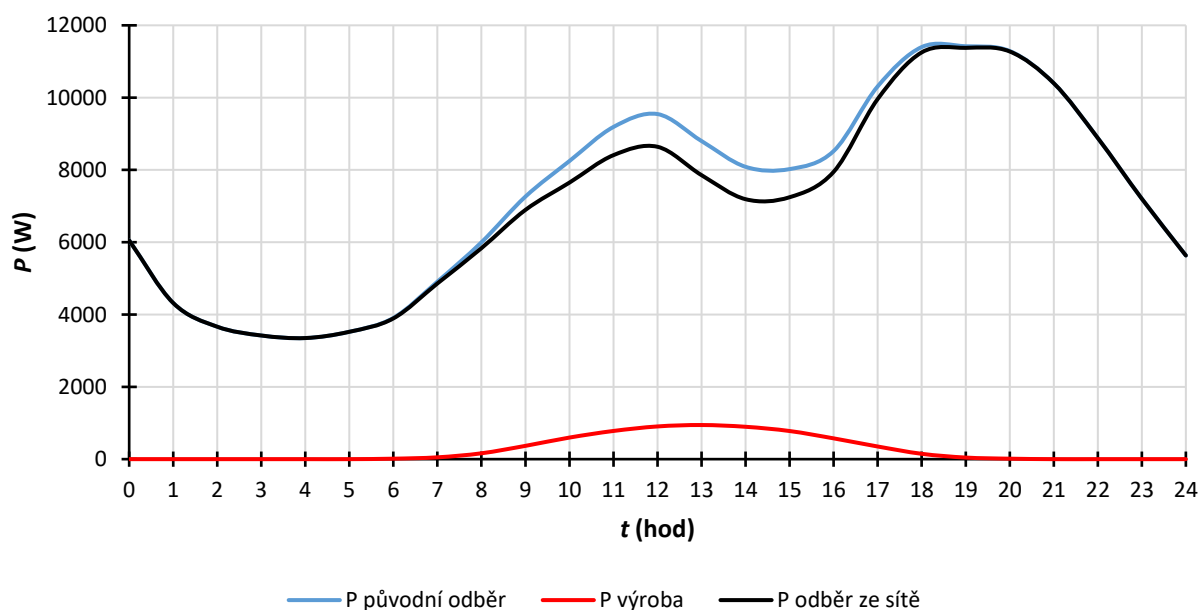


Obr. 6-6 Prosincové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE



Obr. 6-7 Prosincové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE

Obr. 6-7 znázorňuje průběhy složek proudu v místě distribučního transformátoru. Podle očekávání trendy průběhů se shodují s prosincovým typovým denním diagramem dodávky č. 4, viz Obr. 5-2, protože nedochází k dodávce činného výkonu do sítě, neboť výroba v průběhu dne v žádném místě či čase nepřevyšuje odběr.

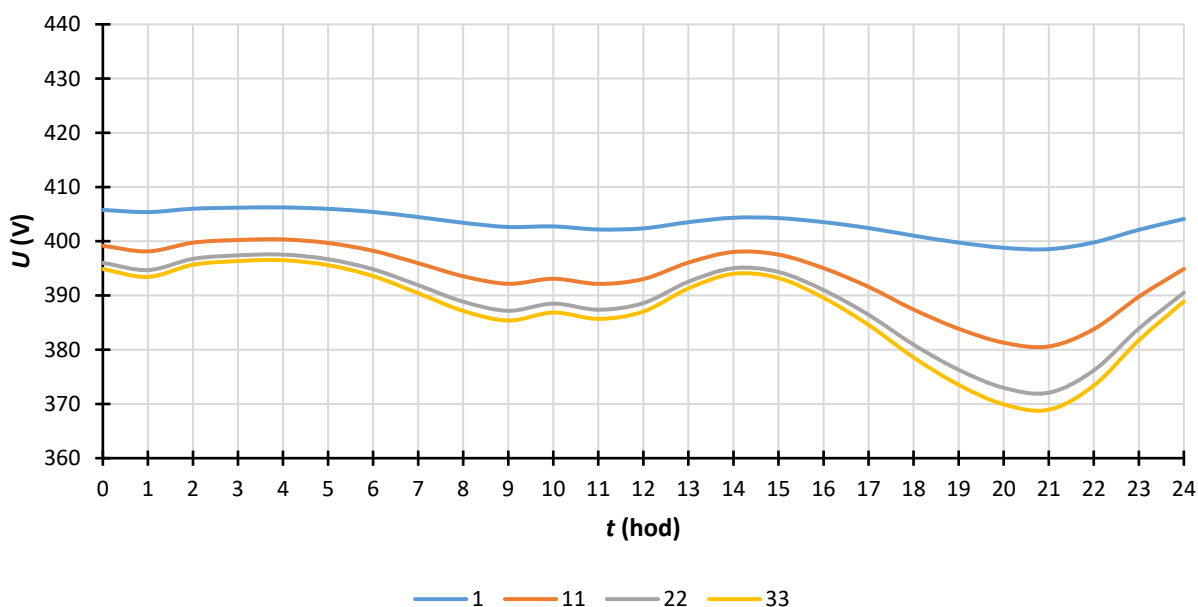


Obr. 6-8 Prosincové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a  $P_{\text{inst}} = 10 \text{ kWp}$

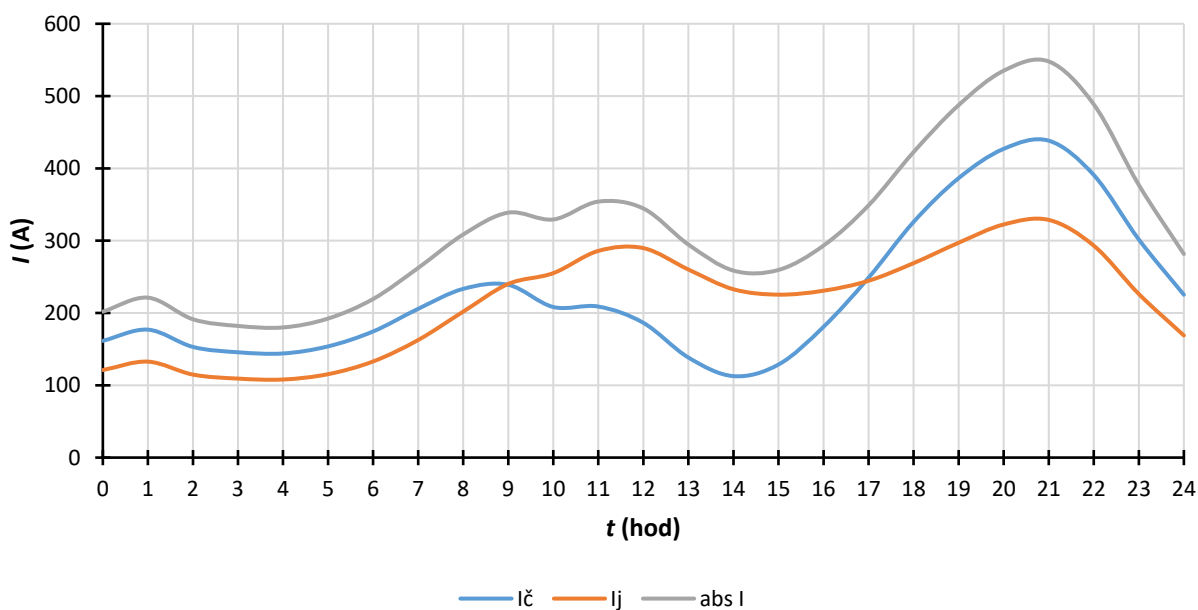
Výkony zobrazené na Obr. 6-8 rovněž korelují výše zmíněné prosincové typové diagramy dodávky a průběhy proudů u transformátoru. Výkon vyrobený z FVE v tomto měsíci dosahuje necelých 10 % instalovaného výkonu. Reálně však většina prosincových dnů je zatažených, takže skutečná výroba může být ještě nepříznivější.

### 6.3 Dubnový stav – plošná instalace FVE

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly, dubnové období bylo vybráno na základě kombinované charakteristiky výroby a odběru, přičemž jsou na mysli vyšší hodnoty odběru v pozdějších hodinách než v případě července, a přitom již znatelná výroba v průběhu dne. To potvrzuje Obr. 6-9, kde je možno vidět nižší extrém ve večerních hodinách u vzdálenějších OM než v případě červencových průběhů napětí (viz Obr. 6-2). Zároveň je evidentní vliv výroby v poledních hodinách, neboť trend charakteristiky napětí zde neodpovídá průběhu odběru. Obr. 6-10 zobrazující průběhy proudů protékající nižší stranou distribučního transformátoru v dubnovém období je podobný jako Obr. 6-3, jen velikosti špiček jednotlivých složek proudů v průběhu dubna dosahují vyšších hodnot, díky vyšším odběrům OM ze sítě v tomto měsíci.



Obr. 6-9 Dubnové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE



Obr. 6-10 Dubnové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE

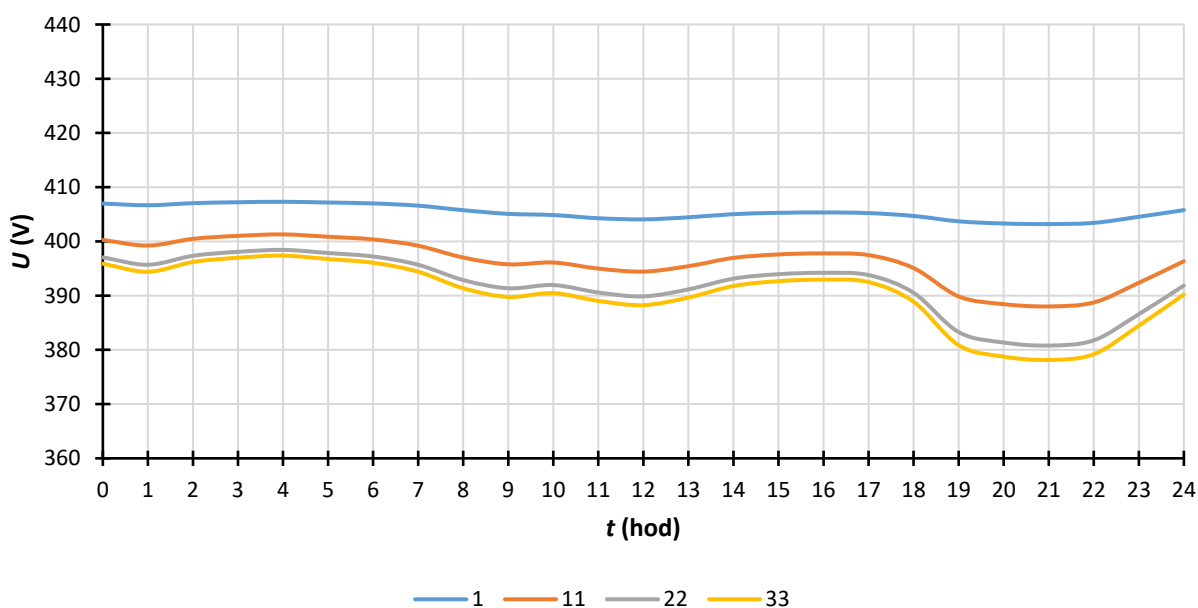
## 7 ANALÝZA VLIVU PLOŠNÉ INSTALACE AKUMULACE

Tato kapitola bude na základě předchozích kapitol analyzovat vliv plošné instalace akumulace v kooperaci s fotovoltaickými výrobny v rámci zadané sítě. Podobně jako v předchozí kapitole budou uvažovány různé scénáře, jejichž cílem bude znázornit účinek akumulace na průběhy napětí ve vybraných OM a průběhy proudů protékající distribučním transformátorem. Scénáře budou opět vyhodnoceny pro tři období (červenec, prosinec a duben) a rovněž se budou analyzovat odlišné integrace výroben s akumulací pro výhledový stav v souladu s dokumentem NAP SG zohledňující kabelové propojení zadané sítě. Dle popisu algoritmu chování modelu při připojení akumulace je evidentní, že velikost akumulované energie je významně závislá na odběru OM. Velikosti jednotlivých odběrů jsou vypočteny díky součinu maximálního rezervovaného příkonu (dle velikosti jističe) a hodnoty normalizovaného typového diagramu dodávky pro danou hodinu. Nutno dodat, že algoritmus pro akumulaci energie v rámci vytvořeného modelu není navrhován z pohledu určení optimální velikosti kapacity akumulátoru na danou domácnost. Výstupem samotného modelu a této práce je analýza vlivu plošné instalace FVE a akumulace na provoz sítě, proto je třeba brát v potaz předpoklady, které ve skutečnosti mohou být naplněny jen částečně, např. zmíněný odběr OM může být v budoucnu reálně nižší, díky trendu snižování spotřeby domácích spotřebičů atd.

### 7.1 Červencový stav – plošná instalace FVE s akumulací

Dle průběhů napětí na vybraných OM na Obr. 6-5 při celoplošné instalaci FVE bylo možno vypořizovat, že napětí může dosahovat limitních hodnot pro odchylky od jmenovitého napětí. Právě pro tento případ se očekává, že akumulování přebytečné energie pomůže zrovnoměnit průběh napětí během dne, nicméně tato skutečnost bude značná až od vyšších hodnot výkonů výroben. V následujících podkapitolách budou analyzovány různé scénáře lišící se zejména rozdílnými instalovanými výkony fotovoltaických výroben.

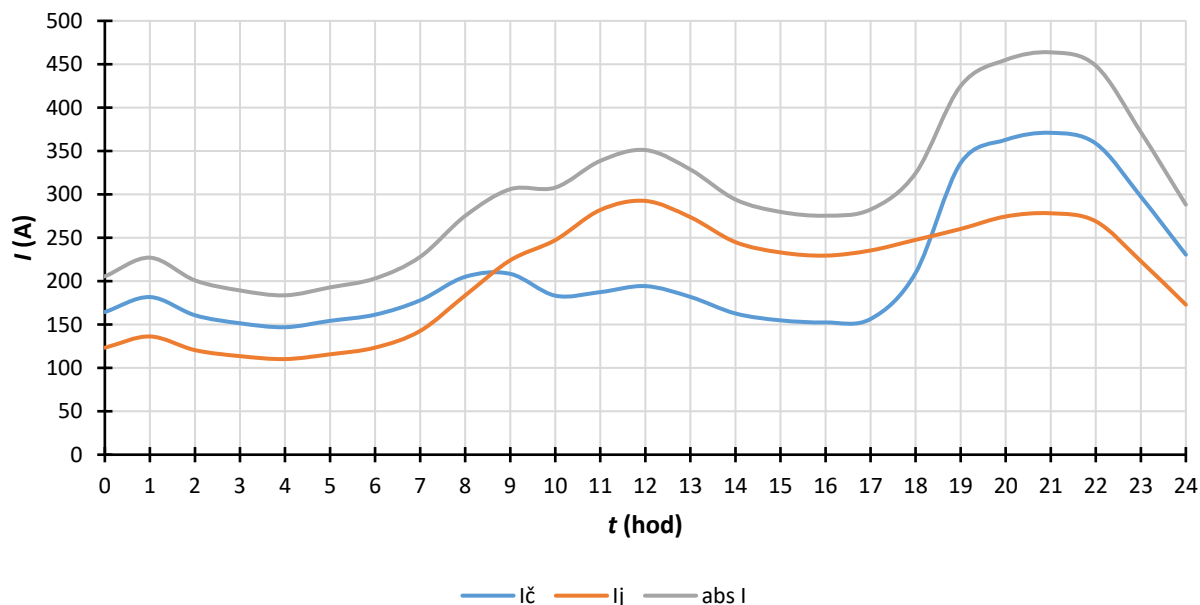
#### 7.1.1 Částečná instalace FVE s instalovaným výkonem 10 kWp na OM



Obr. 7-1 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (10 kWp) s akumulací



Červencové průběhy napětí u vybraných odběrných míst při částečné instalaci FVE včetně akumulace (viz Obr. 7-1) znázorňují, že vliv akumulace v tomto případě není tak markantní v porovnání s průběhy bez připojené akumulace na Obr. 6-2, neboť do akumulátorů není dodáno dostatek energie pro pozdější využití v širším intervalu, než jak je tomu výše v zobrazeném Obr. 7-1. Vliv akumulace je zde využit pouze v odpolední hodinách, a to konkrétně od 14. až do 18. hodiny, přičemž špičky odběru jsou dle Obr. 5-2 pro odběr bez tepelného využití elektřiny teprve očekávány.

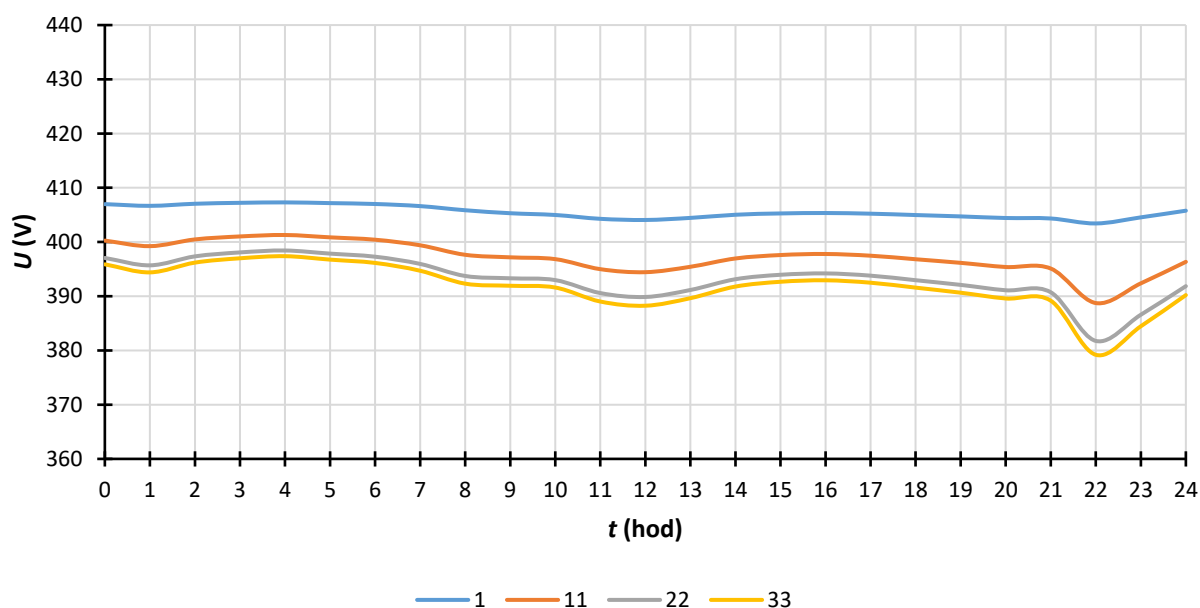


Obr. 7-2 Červencové průběhy proudů protékající DT při část. inst. FVE (10 kWp) s akumulací

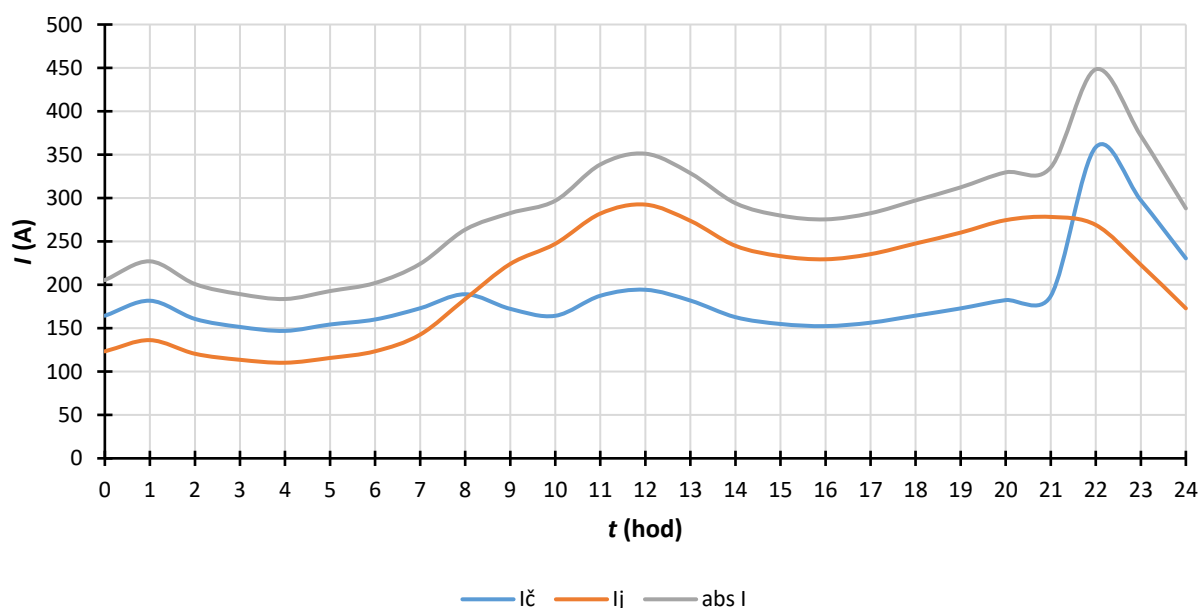
Výše popsanou situaci potvrzuje i Obr. 7-2 zobrazující červencové průběhy proudů v místě distribučního transformátoru, ve kterém se znázorněné průběhy v podstatě neliší od průběhů při částečné instalaci FVE při shodném instalovaném výkonu na OM (viz Obr. 6-3). Odlišnost se týká jen již zmíněného odpoledního intervalu, kdy dochází ke zvýšení činné složky odebíraného proudu oproti závislosti bez akumulace. Je to dáno skutečností, že přebytky výroby nad aktuálním odběrem nevedou do sítě, tak aby došlo k jejich využití v OM bez připojené FVE a akumulace, ale zůstávají v místě přípojky, tedy v rámci objektu OM.

### 7.1.2 Částečná instalace FVE s instalovaným výkonem 14 kWp na OM

Vzhledem k výstupům, které přinesla předchozí podkapitola, se autor této práce rozhodl přidat podkapitolu, která bude analyzovat scénář, jenž bude charakterizován dostatečnou výrobou z FVE, aby vliv akumulace byl vidět v širším časovém spektru než 4 hodiny od doby špičky výroby. To znamená, že na základě tohoto předpokladu bylo třeba navýšit instalovaný výkon fotovoltaických výroben, aby přebytek výroby nad odběrem tekoucí do akumulátorů byl vyšší než v předchozím případě. Jak je vidět z Obr. 7-3, požadovaného cíle se podařilo dosáhnout. Akumulace přestává mít vliv na napětí sítě ve vybraných OM až od 21. hodiny, kdy je zřetelné, že napětí od tohoto bodu klesá o 10 V. Avšak během následujících (nočních) hodin již odběr (pro OM bez tepelného využití elektřiny, viz Obr. 5-2) není tak významný, jako během hodin večerních.

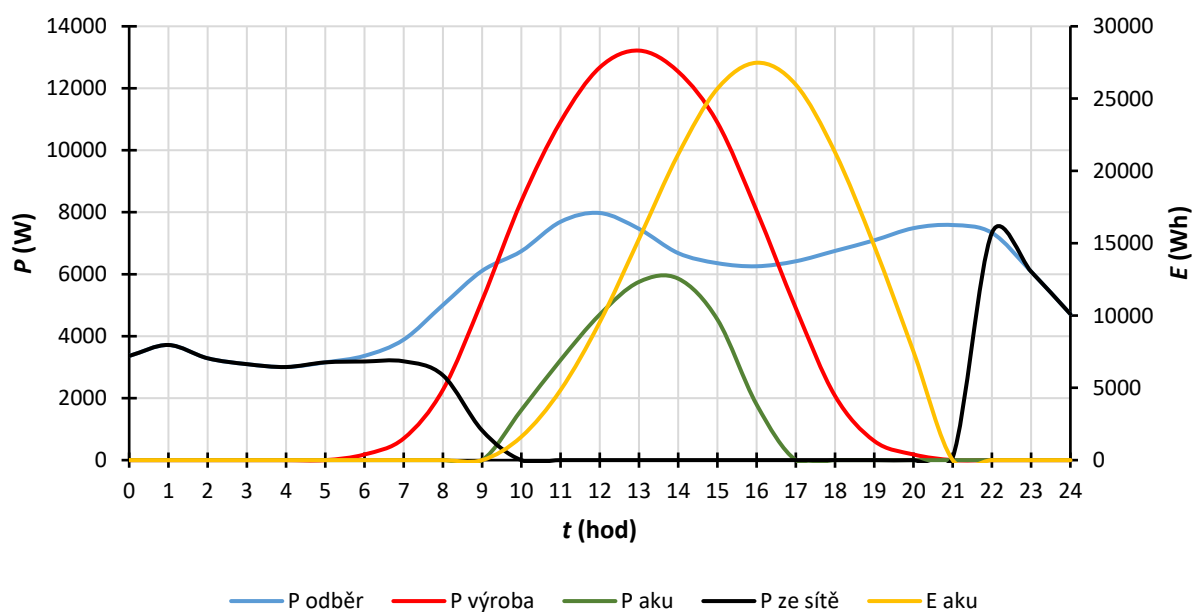


Obr. 7-3 Červencové průběhy napětí při částečné instalaci FVE (14 kWp) s akumulací



Obr. 7-4 Červencové průběhy proudů protékající DT při část. inst. FVE (14 kWp) s akumulací

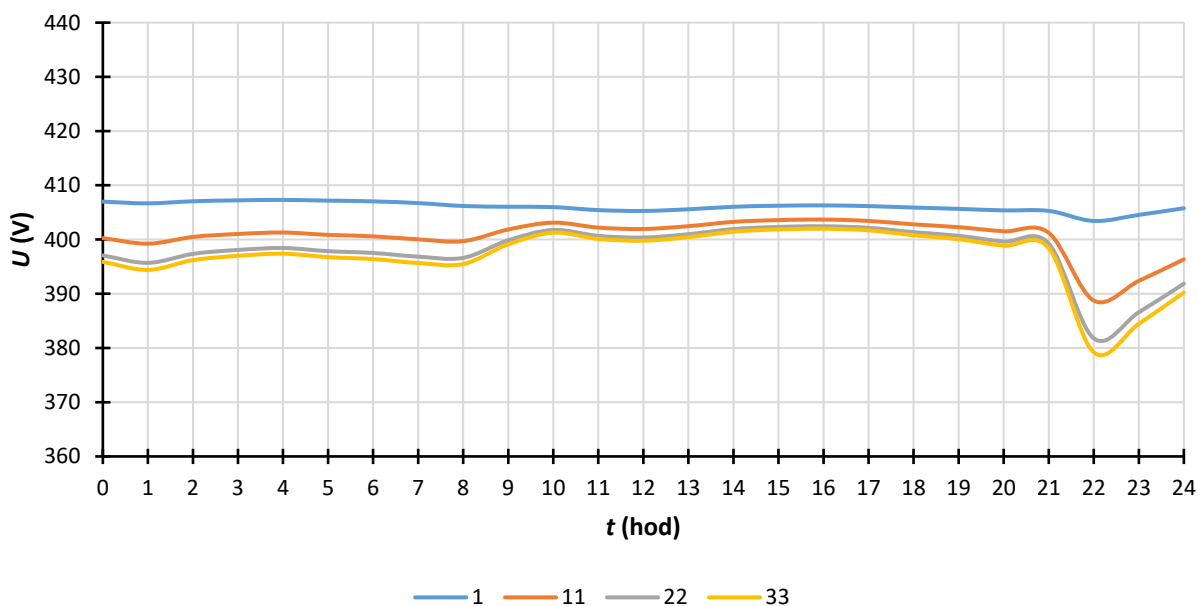
Jak bylo uvedeno v úvodu hlavní kapitoly, je pravděpodobné, že skutečné odběry OM by byly nižší než normalizované typové diagramy dodávky, což by mělo za následek fakt, že by schopnost akumulace vyrovnala i poslední odběrovou špičku. Dle Obr. 7-4 je možné opět pozorovat snížení činné složky proudu v odpoledních i večerních hodinách, přičemž od 21. hodiny večerní již zatížení roste, neboť se již vyčerpala energie z akumulačních jednotek. Výše popsané lze nejlépe vyčíst z Obr. 7-5, který obsahuje žlutou křivku charakterizující průběh energie nejprve dodané do akumulátoru (když rozdíl výroby a odběru je kladný, viz zelená křivka) a následně od 16. hodiny odběr naakumulované energie (jakmile odběr převyší výrobu). Jelikož tato žlutá křivka není nijak omezena (respektive její špička není tzv. ořezána), je zřejmé, že naakumulovaná energie nedosáhla kapacity akumulátoru, jejíž hodnota byla nastavena jako dvojnásobek instalovaného výkonu fotovoltaické výroby. Proto bude vytvořen další scénář, na kterém bude simulován fakt, kdy nastane naplnění kapacity akumulace, což bude mít za následek dodávku přebytku činného výkonu do sítě (v tomto případě se rozumí zbytek výkonu, kterému není umožněna dodávka do akumulace), jako tomu bylo v části analýzy instalace FVE bez připojené akumulace. Tato skutečnost bude analyzována v rámci podkapitoly Celoplošná instalace FVE s instalovaným výkonem 20 kWp na OM.



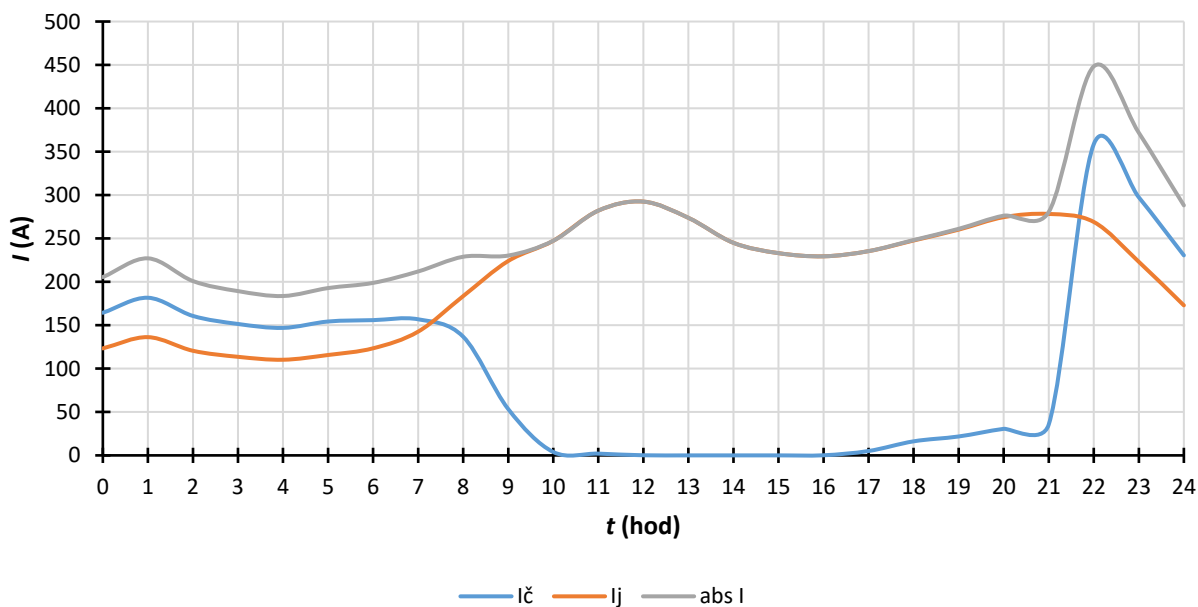
Obr. 7-5 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a  $P_{\text{inst}} = 14 \text{ kWp}$

### 7.1.3 Celoplošná instalace FVE s instalovaným výkonem 14 kWp na OM

Následující podkapitola má za cíl demonstrovat vliv celoplošné instalace fotovoltaických výroben s akumulací v rámci sítě, a to s instalovaným výkonem 14 kWp na odběrné místo. V následujícím scénáři je dle Obr. 7-6 možné pozorovat velmi podobný trend křivek s křivkami při částečné instalaci FVE s akumulací se shodným instalovaným výkonem (viz Obr. 7-3), avšak v tomto případě napětí v odpoledních hodinách přesahuje jmenovitou hodnotu 400 V a následně u všech odběrných míst, stejně jako v případě popsaném v předchozí kapitole, nastává po 21. hodině pokles napětí až k hodnotě 380 V (u posledního odběrného místa).



Obr. 7-6 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE (14 kWp) s akumulací

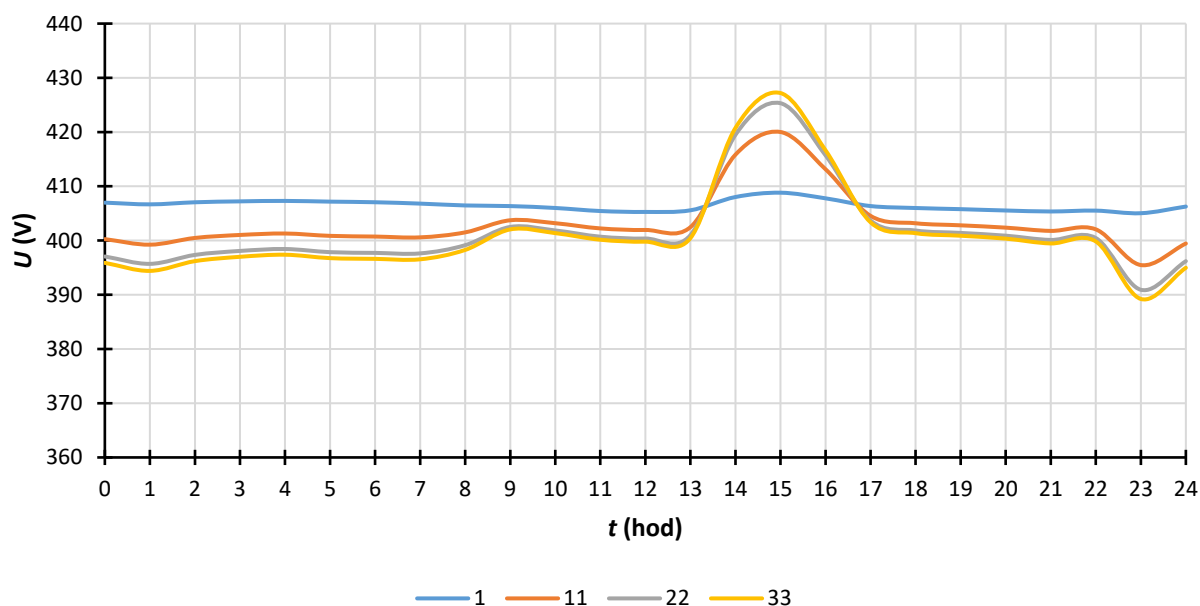


Obr. 7-7 Červencové průběhy proudů protékající DT při celopl. inst. FVE (14 kWp) s akumulací

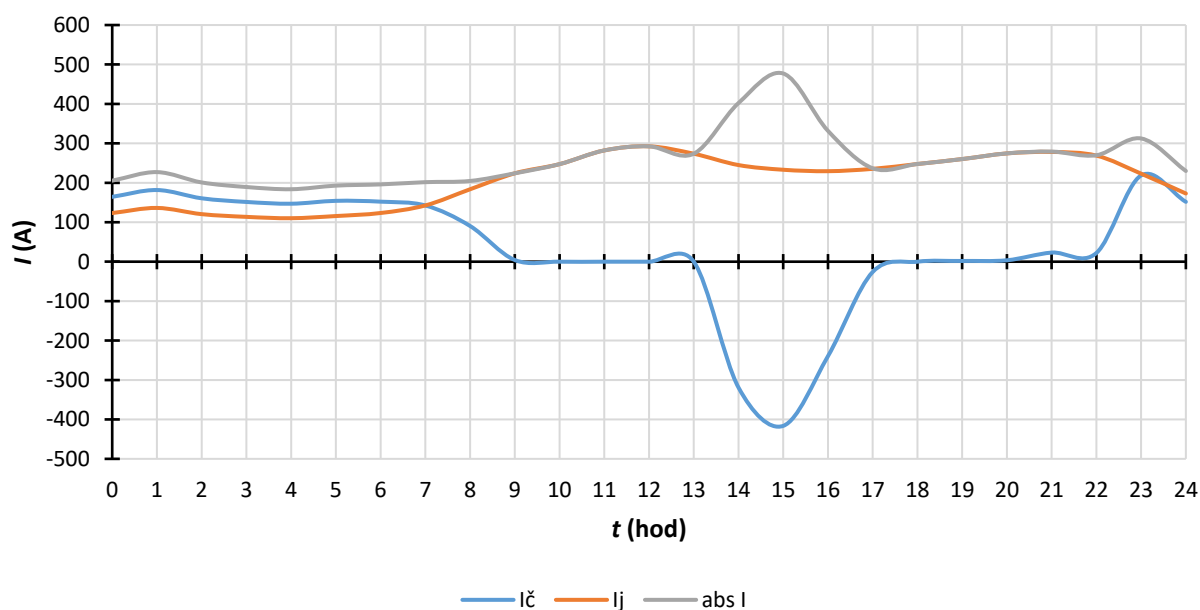
I zde se nedosáhlo v žádném OM naplnění kapacity akumulace, nedošlo tedy k dodávce činného výkonu do sítě. Tím pádem díky dostatečné výrobě z FVE dosahuje činná složka odběrového proudu již od 10. až do 16. hodiny nulových hodnot, respektive pak do 21. hodiny večerní velmi nízkých hodnot (viz Obr. 7-7). Je to dáno faktem, že výrobní s velkým instalovaným výkonem společně s akumulací jsou integrovány do každého odběrného místa.

#### 7.1.4 Celoplošná instalace FVE s instalovaným výkonem 20 kWp na OM

Následující podkapitola bude popisovat již zmíněný scénář, kdy bude dosaženo naplnění kapacity akumulátoru, jehož následkem bude dodávka zbývající části vyrobeného činného výkonu do sítě. V modelu byl nastaven instalovaný výkon FVE 20 kWp, a to do každého odběrného místa (celoplošná instalace).

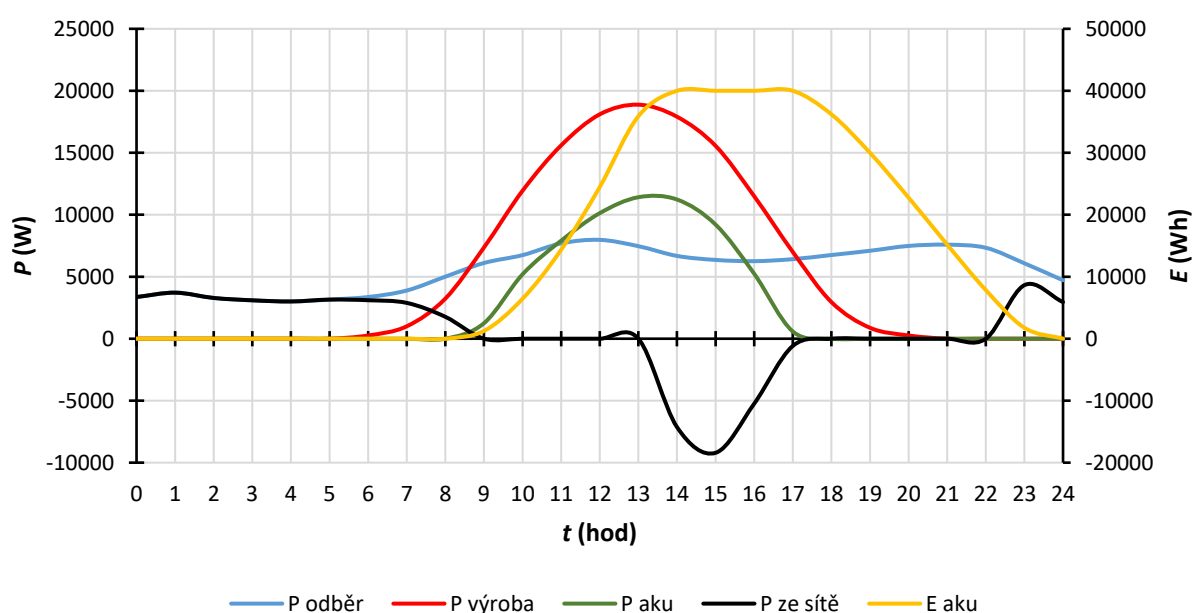


Obr. 7-8 Červencové průběhy napětí při celoplošné instalaci FVE (20 kWp) s akumulací



Obr. 7-9 Červencové průběhy proudů protékající DT při celopl. inst. FVE (20 kWp) s akumulací

Na Obr. 7-8 je zřejmý podobný trend průběhů napětí ve vybraných OM, nicméně od 13. hodiny již napětí rapidně narůstá, podobně i s rostoucí vzdáleností od distribučního transformátoru, kde maximum napětí v posledním OM atakuje hodnoty 430 V. Tato skutečnost je dána právě dosažením kapacity akumulátoru (pro tyto simulace nastavena hodnota kapacity akumulace jako dvojnásobek číselné hodnoty instalovaného výkonu FVE v rámci odběrného místa – zde tedy 40 kWh). Výše popsany fakt je velmi dobře znázorněn i na Obr. 7-10, kde je vidět, že energie akumulátoru je omezena limitní hodnotou 40 kWh a není dále překročena. Dále je zobrazen výkon, který je odebírán OM ze sítě, avšak právě v časovém intervalu, kdy je akumulátor naplněn, dochází k dodávce přebytečného výkonu do sítě (znázorněno zápornými hodnotami činného výkonu). Součet všech činných výkonů ze všech OM, které tyto přebytky dodávají do sítě, má za následek nežádoucí přetok tohoto součtového činného výkonu do vyšší nadřazené soustavy.



Obr. 7-10 Červencové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a  $P_{\text{inst}} = 20 \text{ kWp}$

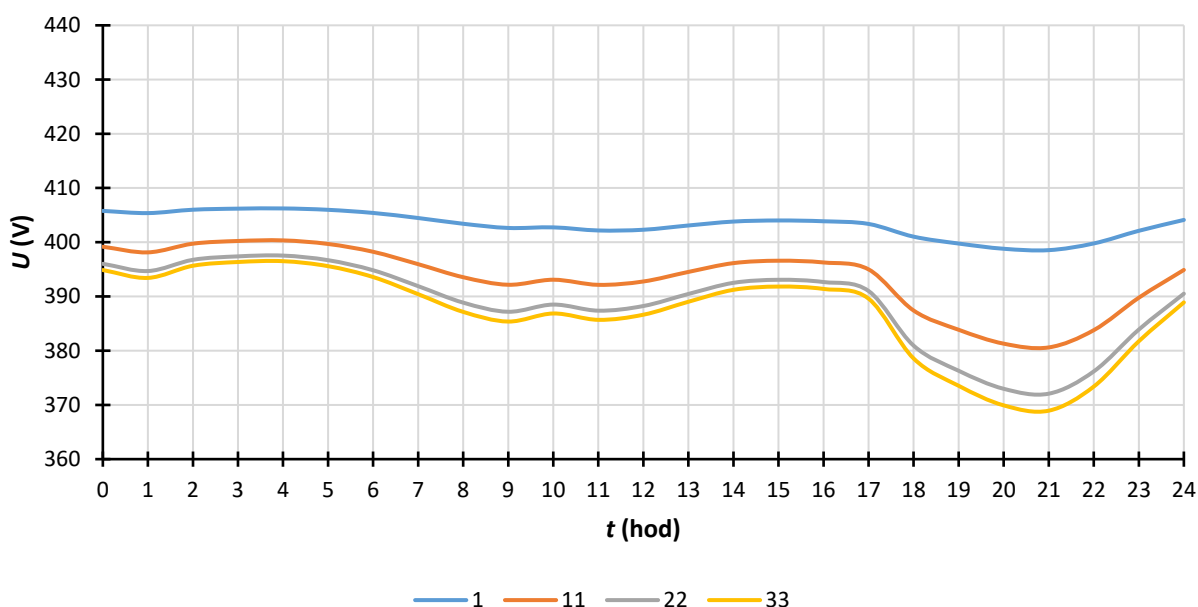
## 7.2 Prosincový stav – plošná instalace FVE s akumulací

Prosincový stav ať už částečné nebo celoplošné instalace fotovoltaickými výrobny společně s akumulací nemá smysl graficky znázorňovat, neboť zde nedochází k značným rozdílům po připojení akumulace. Je to dáno skutečností, že výroba elektrické energie není dostatečná, aby vůbec převýšila v průběhu dne daný odběr, tím tedy není možné na základě pomoci vytvořeného programu energii naakumulovat. Vytvořený model neumožňuje akumulaci elektrické energie z jiného zdroje než z připojené fotovoltaické výroby, tudíž je zde i prostor pro případné zlepšení a rozšíření tohoto modelu. Toto případné rozšíření se může týkat akumulace veškeré energie, která se pomocí fotovoltaických panelů vyrobí a následně by tato energie byla postupně čerpána ve špičce odběru (zejména ve večerních hodinách).

Eventuálně další variantou by bylo využití schopnosti skladovat elektrickou energii v souladu provozováním dvoutarifové sazby. To znamená, že v době sepnutí nízkého tarifu by se začala dodávat elektrické energie ze sítě i do akumulátorů, a to s cílem využití této naakumulované energie v době tarifu vysokého. Tato možnost je však v současnosti z ekonomických důvodů nemožná, nicméně pokud se do budoucna sníží cena akumulačních zařízení, případně budou poskytnuty finanční dotace na provoz v tomto smyslu, může se stát tato alternativa reálnou možností v případě dosažení určité rentability.

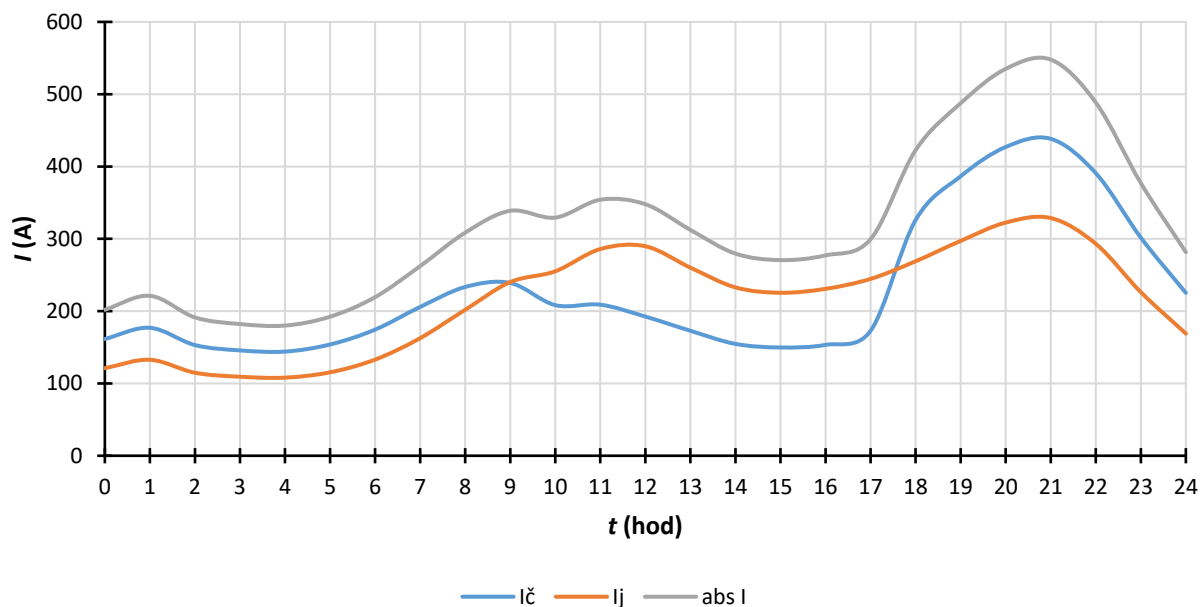
### 7.3 Dubnový stav – plošná instalace FVE s akumulací

Analýza dubnového stavu plošné instalace fotovoltaických výroben společně s akumulací bude založena na podobných průbězích, jako tomu bylo v případě červencového stavu. Odlišnost však bude u odběru bez tepelného využití elektřiny zejména ve večerních hodinách, kdy dle typových diagramů dodávky zobrazených na Obr. 5-2 dubnové špičky budou dosahovat vyšších hodnot odběru, naopak výroba elektrické energie nebude mít úroveň červencové výroby. Z toho plyne, že bude obtížnější energii v průběhu dne naakumulovat a následně bude třeba na pokrytí pozdějších odběrů více energie (bude třeba vyšší dodávka z akumulace).



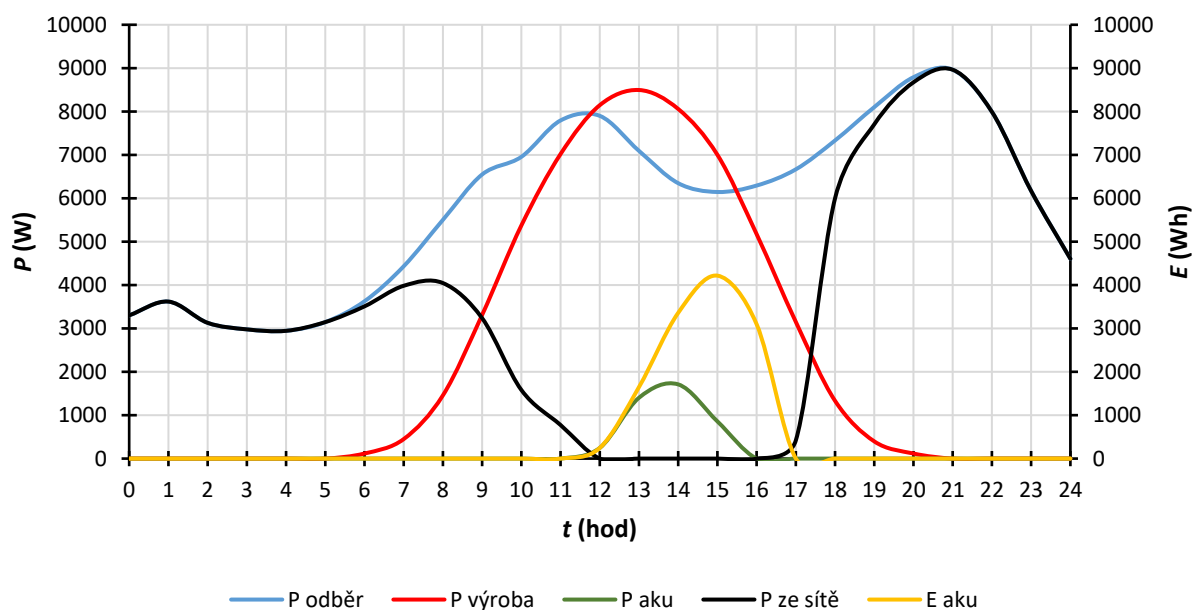
Obr. 7-11 Dubnové průběhy napětí vybraných OM při částečné instalaci FVE s akumulací

Dubnové průběhy napětí vybraných odběrných míst při částečné instalaci fotovoltaických výroben o instalovaném výkonu 10 kWp společně s připojenou akumulací jsou zobrazeny na Obr. 7-11. Vliv akumulace zde není tak značný jako v červencové variantě se shodným zadáním, časový interval je zde kratší, neboť se během dne nestihne naakumulovat vyšší množství elektrické energie, které by tento interval prodloužilo. Po vyčerpání naskladněné energie napětí klesá a průběhy jsou totožné jako na Obr. 6-9 zobrazující napětí v dubnovém období při částečné instalaci FVE bez připojené akumulace.



Obr. 7-12 Dubnové průběhy proudů protékající DT při částečné instalaci FVE s akumulací

Výše popsané potvrzují i křivky znázorněné v Obr. 7-12. Zejména modrá křivka charakterizující činnou složku proudu protékající v místě distribučního transformátoru má rovnoměrnější průběh v porovnání s Obr. 6-10 (bez akumulace), a to v intervalu od 12. do 17. hodiny. Dle Obr. 7-13 je evidentní, že se jedná právě o interval ovlivněný připojenou akumulací, nicméně vzhledem ke skutečnosti, že dubnová výroba opravdu výrazně nepřevyšuje odběr, akumulátory nejsou v tomto období dostatečně využity. Při celoplošné instalaci FVE včetně připojené akumulace by odběrná místa v tomto časovém intervalu neodebírala činný výkon ze sítě, tím pádem by činná složka proudu v místě distribučního transformátoru dosahovala mizivých hodnot. Aby došlo k rozšíření tohoto intervalu, bylo by třeba zvýšit výrobu (zvýšit instalovaný výkon FVE), či snížit spotřebu. Nicméně užití akumulace v dubnovém období pro tuto zadanou síť nemá v porovnání s červencovou variantou takový vliv na napěťové a proudové průběhy.



Obr. 7-13 Dubnové průběhy odběru a výroby u OM 1 s jističem 25 A a  $P_{\text{inst}} = 10 \text{ kWp}$



## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou akumulace elektrické energie, vysvětluje samotný pojem akumulace elektrické energie a zejména objasňuje důležitost její potřeby v elektrizačních soustavách. Pro stabilní chod elektrizační soustavy je nutno dodržet rovnováhu mezi výrobou, spotřebou a ztrátami elektrické energie. Při očekávaném růstu počtu nových zdrojů, a hlavně výkonů těchto zdrojů pracujících do elektrizační soustavy je evidentní, že nárůst výkonu bude mít vliv na řízení elektrizační soustavy a nutnost skladování elektrické energie se tím rovněž zvýší. Akumulace elektrické energie je možností, jak docílit bezproblémový chod a omezit nevyzpytatelné výkonové rázy způsobené výrobou z intermitentních zdrojů, zároveň tedy má schopnost udělat z OZE spolehlivý zdroj v dodávkách energie i v rámci denního diagramu zatížení. Zvýšila by se tak celková spolehlivost a kvalita provozu celé elektrizační soustavy.

Hlavním cílem bylo seznámení se s možnými druhy akumulačních technologií elektrické energie, jejich vzájemné srovnání a využití v praxi. V úvodu práce je popsán kontext a určitá podstata řešení problematiky související s aktuálností pojmu akumulace, jež je výše nastíněna. Po uvedení do problematiky již práce navazuje popisem jednotlivých technologií a jejich principů. Jedná se zejména o technologie, jež mají v současnosti smysl a uplatnění v praxi, respektive, jejichž vývoj je k takovému uplatnění v nejbližší době směřován nebo již byly uskutečněny funkční modely i v případech, že jejich další rozvoj je neperspektivní nebo čekají na pokrok v jiných technologiích. Popis jednotlivých technologií akumulace obsahuje mimo obecně známé informace o principech fungování také aktuálně funkční a provozované systémy či připravované systémy, jež jsou právě ve výstavbě, resp. na jejím počátku. Jak již bylo výše naznačeno, cílem této diplomové práce bylo rovněž vzájemně tyto systémy srovnat dle vhodných kritérií. Tomuto porovnání se věnuje třetí kapitola, jejímž výstupem jsou zejména grafy reflektující hodnoty technických parametrů z Tab. 3-1.

Dále práce pokračuje kapitolou charakterizující způsoby využití akumulace v síti. Při výběru vhodné technologie akumulace je nutné dokonale znát jejich principy funkčnosti, technické parametry a jejich charakteristické vlastnosti, jež by mohly korelovat záměr využití v soustavě. Mezi sledované parametry patří například výkon, kapacita, doba vybíjení, doba náběhu, měrný výkon a energie (obvykle vztažená na hmotnost nebo objem systému akumulace), účinnost celého systému, počet cyklů a zejména životnost. Přestože se vývoj obtížně predikuje, předpokládá se, že všechny popsané způsoby skladování elektrické energie v této práci budou v budoucnu používány a dále zdokonalovány.

V návaznosti na výše uvedené, byl v rámci této diplomové práce vytvořen model pro výpočet ustáleného chodu paprskové sítě nn (model je součástí této práce na vloženém CD v samostatné příloze), který slouží jako nástroj pro analýzu vlivu plošné instalace fotovoltaických výroben do zadané sítě a na její provoz, případně pro analýzu vlivu připojené akumulace. Jsou popsány odlišné scénáře pro tři období – červenec, prosinec a duben. Každé toto období má z energetického pohledu různé charakteristiky odběrů či potenciální výroby z FVE. Na základě specifik, jež jsou uvedeny v průběhu jednotlivých analýz, je vhodné konstatovat, že vliv akumulace je signifikantní zejména v červencovém období, kdy výroba výrazně převyšuje odběr, přičemž je možné tento přebytek kumulovat do připojených baterií. Nicméně je třeba dodat, že je třeba mít na mysli určitou kapacitní rezervu této akumulace, aby nedošlo k výrazným přetokům činného výkonu do vyšší napěťové hladiny a zároveň nedošlo k výraznému nárůstu napětí v odběrných místech.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Aktualizace Státní energetické koncepce České republiky* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52041/59168/618616/priloha001.pdf>
- [2] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG)* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52353/60358/633373/priloha003.pdf>
- [3] BERAN, H., ZÁPOTOCKÁ, A., STŘELEČEK, M., JANEČEK, P. Bezpečná integrace obnovitelných zdrojů energie do distribučních sítí: Odborný měsíčník pro elektřárenství, teplárenství a použití energie. *Energetika*. 2015, 65(11), pp. 563-566. ISSN 0375-8842.
- [4] MASTNÝ, P a kol. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2016-12-31]. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [5] RADIL, L. *Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Vysoké učení technické v Brně: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013, 166 s. Dizertační práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [6] ALLEN, R.D., DOHERTY, T.J., KANNBERG, L.D. *Summary of selected compressed air energy storage studies* [online]. Richland, WA (USA): Pacific Northwest Labs, 1985 [cit. 2016-12-31]. DOI: 10.2172/5872515. Dostupné z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5872515>
- [7] ROZMAJZL, L. Jak skladovat elektřinu v moři a pod zemí. *Hospodářské noviny* [online]. 2012 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: [http://img.ihned.cz/attachment.php/690/37774690/iouv4DE7GHJKLMNjPQWcefhqz02ARVmn/EK12\\_52.gif](http://img.ihned.cz/attachment.php/690/37774690/iouv4DE7GHJKLMNjPQWcefhqz02ARVmn/EK12_52.gif)
- [8] Compressed air instead of a pumped-storage power plant. *Energiespeicher* [online]. Jülich, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://forschung-energiespeicher.info/en/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/DruckluftstattPumpspeicher/>
- [9] *Global Energy Storage Database* [online]. Department of Energy (USA): Sandia Corporation, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.energystorageexchange.org/>
- [10] *Energy Storage Association* [online]. Washington (USA): ESA, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://energystorage.org/>
- [11] PANEK, R. a kol. Status of the COMPASS Tokamak Reinstallation in Institute of Plasma Physics AS CR. In: *36th EPS Conference on Plasma Physics*. Sofia: ECA, 2009.
- [12] MAREŠ, J., LIBRA, M., POULEK, V. Akumulace elektrické energie. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. 2011, 2011(2). ISSN 1210-0889.
- [13] Duke Energy to upgrade its Notrees Energy Storage System. In: *PR Newswire* [online]. Charlotte (USA): PR Newswire Association LLC., 2015 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.prnewswire.com/news-releases/duke-energy-to-upgrade-its-notrees-energy-storage-system-300106741.html>
- [14] NiCd akumulátory. *Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. Slaný: BATTEX, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=38>
- [15] LUO, X. a kol. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* [online]. 2015, (137), pp. 511-536 [cit. 2016-12-31]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>

- [16] NAS: Sodium Sulfur Battery Energy Storage System [online]. Nagoya: NGK INSULATORS, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <https://www.ngk.co.jp/nas/>
- [17] Toshiba [online]. Tokyo: Toshiba, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.toshiba.co.jp/worldwide/index.html>
- [18] PLÉHA, D. Vanadové redoxní baterie. *Chempoint* [online]. Fakulta chemická: Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/vanadove-redoxni-baterie>
- [19] Selected to be Subsidized by the Governmental Program for Urgent Demonstration Project of Large-scale Energy Storage Systems. *Sumitomo Electric Industries* [online]. Osaka: Sumitomo Electric Industries [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: [http://global-sei.com/news/press/13/prs088\\_s.html](http://global-sei.com/news/press/13/prs088_s.html)
- [20] UniEnergy Technologies Strategic Partner to Deliver World's Largest Battery. *UniEnergy Technologies* [online]. Mukilteo: UniEnergy Technologies, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.uettechnologies.com/news/72-unienergy-technologies-strategic-partner-to-deliver-world-s-largest-battery>
- [21] First CellCube Vanadium-Redox-Flow storage systems installed in Czech Republic. *Gildemeister* [online]. Würzburg: Gildemeister, 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://energy.gildemeister.com/en/company/news/b64/381820>
- [22] VENUGOPAL, S. Advanced Energy Storage – Flow Batteries. *Innovation Flow* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://innovationflow.blogspot.cz/2016/03/advanced-energy-storage-flow-batteries.html>
- [23] MAKVA, M., PAULOVÍČ, S. Využitie cievky v supravodivom stave na akumuláciu elektrickej energie. *Informačné a automatizačné technológie v riadení kvality produkcie* [online]. Vernár, 2005, pp. 74-79 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: [http://www.slpk.sk/eldo/2005/010\\_05/14.pdf](http://www.slpk.sk/eldo/2005/010_05/14.pdf)
- [24] ŠTĚRBA, M. Regulace, akumulace - neuralgický bod elektrizační soustavy. In: *Pro Atom Web* [online]. 2008 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://proatom.luksoft.cz/view.php?cislocclanku=2008050001>
- [25] HRADÍLEK, Z., MOLDŘÍK, P. Akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů: Odborný měsíčník pro elektrárenství, teplárenství a použití energie. *Energetika*. 2010, pp. 228-231. ISSN 0375-8842.
- [26] MAJLING, E. Jak si představuje energetiku v roce 2050 Evropská unie? In: *OEnergetice* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/evropska-unie/energetika-2050-podle-evropske-unie/>
- [27] KABEŠ, K. Adiabatická tlakovzdušná akumulární elektrárna. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. 2011, 2011(6). ISSN 1210-0889.
- [28] SFŽP ČR. *Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu Nová zelená úsporám: Rodinné domy* [online]. Praha: SFŽP ČR, 2016 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: [http://www.novazelenausporam.cz/file/818/nzu\\_zavazne-pokyny-pro-zadatele-rd-3-vyzva\\_11-2016.pdf](http://www.novazelenausporam.cz/file/818/nzu_zavazne-pokyny-pro-zadatele-rd-3-vyzva_11-2016.pdf)
- [29] NKT CABLES. *Katalogový list: NAYY 0,6/1 kV: Instalační kabely s Al jádrem* [online]. Kladno: nkt cables, 2017 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: [http://www.nkt.cz/fileadmin/user\\_upload/Products/Data\\_sheets/NAYY+DS+CZ+EN.pdf](http://www.nkt.cz/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/NAYY+DS+CZ+EN.pdf)

# PŘÍLOHA A

Tab. A-1 Zadané parametry jednotlivých odběrných míst pro částečnou instalaci FVE

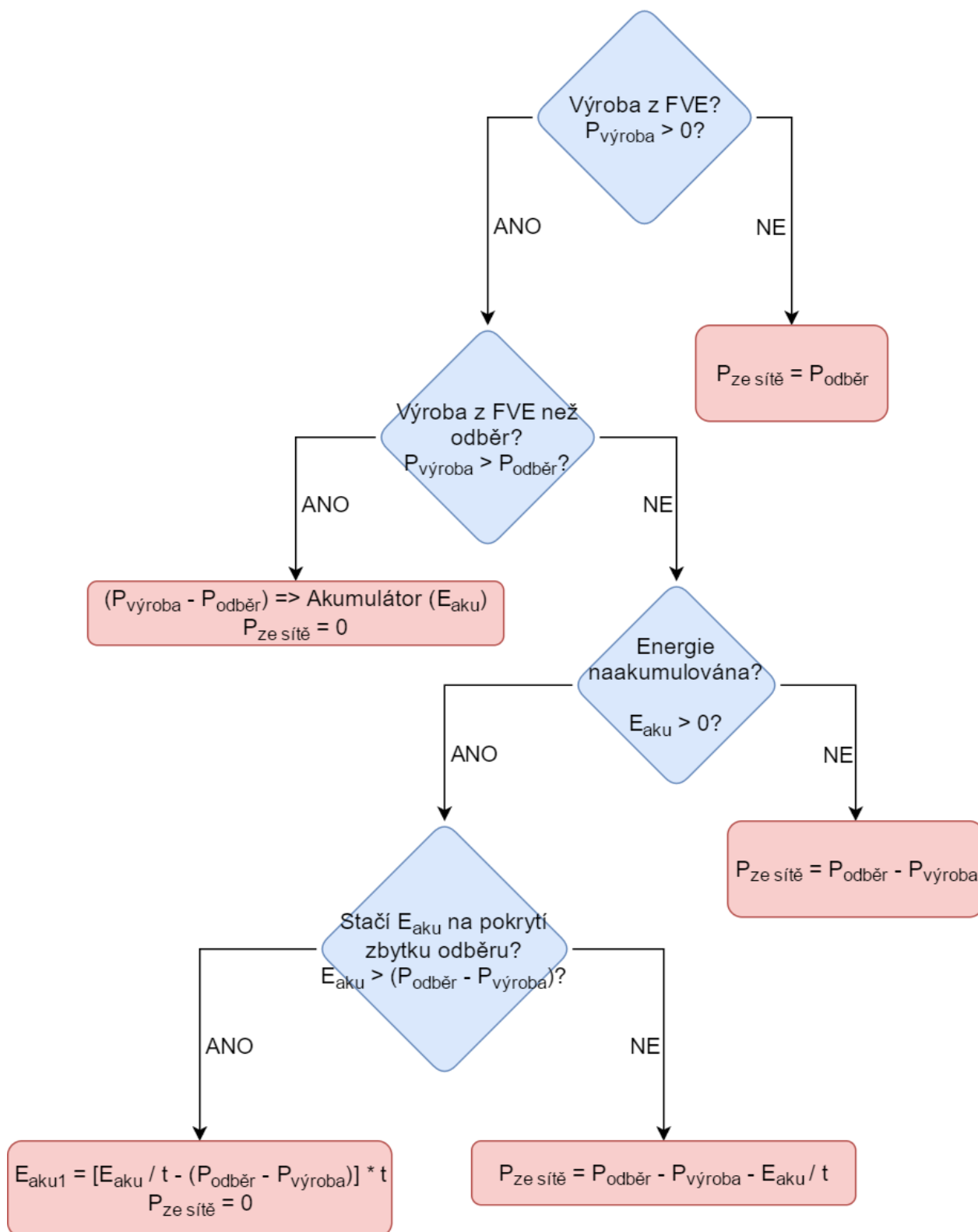
Odběrné místo	$\cos \varphi$ (-)	$\sin \varphi$ (-)	$U_n$ (V)	$I_{max}$ (A)	$S_{odběr}$ (VA)	$P_{inst}$ (Wp)
1	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
2	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
3	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
4	0,8	0,6	400	40	27712,81	0
5	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
6	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
7	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
8	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
9	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
10	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
11	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
12	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
13	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
14	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
15	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
16	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
17	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
18	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
19	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
20	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
21	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
22	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
23	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
24	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
25	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
26	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
27	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
28	0,8	0,6	400	32	22170,25	0
29	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
30	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
31	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000
32	0,8	0,6	400	25	17320,51	0
33	0,8	0,6	400	25	17320,51	10000

## PŘÍLOHA B

Tab. B-1 Zadané parametry jednotlivých úseků mezi po sobě následujícími odběrnými místy

ÚSEK	$R_k$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$L_k$ (mH/km)	$l$ (km)	$R$ ( $\Omega$ )	$X$ ( $\Omega$ )
1	0,206	0,23	0,04	0,00824	0,00289
2	0,206	0,23	0,02	0,00412	0,001445
3	0,206	0,23	0,018	0,003708	0,001301
4	0,206	0,23	0,019	0,003914	0,001373
5	0,206	0,23	0,02	0,00412	0,001445
6	0,206	0,23	0,019	0,003914	0,001373
7	0,206	0,23	0,023	0,004738	0,001662
8	0,206	0,23	0,018	0,003708	0,001301
9	0,206	0,23	0,019	0,003914	0,001373
10	0,206	0,23	0,015	0,00309	0,001084
11	0,206	0,23	0,019	0,003914	0,001373
12	0,206	0,23	0,018	0,003708	0,001301
13	0,206	0,23	0,016	0,003296	0,001156
14	0,206	0,23	0,01	0,00206	0,000723
15	0,206	0,23	0,015	0,00309	0,001084
16	0,206	0,23	0,02	0,00412	0,001445
17	0,206	0,23	0,004	0,000824	0,000289
18	0,206	0,23	0,016	0,003296	0,001156
19	0,206	0,23	0,008	0,001648	0,000578
20	0,206	0,23	0,016	0,003296	0,001156
21	0,206	0,23	0,009	0,001854	0,00065
22	0,206	0,23	0,011	0,002266	0,000795
23	0,206	0,23	0,016	0,003296	0,001156
24	0,206	0,23	0,017	0,003502	0,001228
25	0,206	0,23	0,015	0,00309	0,001084
26	0,206	0,23	0,007	0,001442	0,000506
27	0,206	0,23	0,017	0,003502	0,001228
28	0,206	0,23	0,009	0,001854	0,00065
29	0,206	0,23	0,016	0,003296	0,001156
30	0,206	0,23	0,013	0,002678	0,000939
31	0,206	0,23	0,011	0,002266	0,000795
32	0,206	0,23	0,014	0,002884	0,001012
33	0,206	0,23	0,005	0,00103	0,000361

## PŘÍLOHA C



Obr. C-1 Vývojový diagram pro akumulaci elektrické energie